

VISIT...

LANZAROTE  
*Caliente*.COM

Д. Д. МАКСУТОВ

# ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ



МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1984

Максutow Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. — 2-е изд. — М.: «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 272 с.

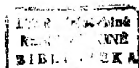
В книге на высоком научном уровне описаны требования к материалам для зеркал, линз и призм, способы разгрузки астрономической оптики, методы шлифовки и полировки, методы контроля и исследования астрономической оптики, а также компенсационный метод исследования асферических зеркал.

Книга предназначена для астрономов, оптиков-профессионалов, инженеров-технологов оптических специальностей, работников лабораторий. Книга будет полезна студентам и аспирантам астрономических специальностей университетов, оптических и приборостроительных факультетов вузов. Книгой будут пользоваться участники телескопостроительных кружков, любители астрономии.

Тираж 30 экз. 122 экз. 85

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р. Е. ГЕРШБЕРГ, Н. В. МЕРМАН,  
П. П. МНХЕЛЬСОН (отв. редактор), М. А. СОСНИНА



3.126971

Дмитрий Дмитриевич Максutow

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Редактор Г. С. Куликов

Техн. редактор И. Ш. Аксельрод, Корректоры Е. А. Белицкая, И. И. Кришталь

ИБ № 12437

Сдано в набор 24.10.83. Подписано к печати 14.06.84. Т-13261. Формат 60×90<sup>1/8</sup>. Бумага тип. № 1. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Условн. печ. л. 17. Усл. кр.-отт. 17. Уч.-изд. л. 18,68. Тираж 3600 экз. Заказ № 854. Цена 3 р.

Издательство «Наука»  
Главная редакция физико-математической литературы  
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

4-й типографии издательства «Наука»  
630077, Новосибирск, 77, Сталинского, 25

М 1704050000 — 108 119-84  
053(02)-84

© Издательство «Наука».  
Главная редакция  
физико-математической литературы,  
1984, с изменениями.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Предисловие редколлегии ко второму изданию . . . . .                                                                     | 4   |
| Список работ Д. Д. Макутова по методам изготовления и контроля астрономической оптики . . . . .                          | 5   |
| Список дополнительной рекомендуемой литературы по методам изготовления, контроля и исследования крупной оптики . . . . . | 6   |
| Глава I. Точности изготовления . . . . .                                                                                 | 9   |
| Глава II. Материалы для зеркал . . . . .                                                                                 | 25  |
| Глава III. Материалы для преломляющей оптики . . . . .                                                                   | 40  |
| Глава IV. Деформации и разгрузка оптики . . . . .                                                                        | 63  |
| Глава V. Шлифовка и полировка . . . . .                                                                                  | 88  |
| Глава VI. Обработка крупной оптики . . . . .                                                                             | 108 |
| Глава VII. Станки и машины для тонкой шлифовки и полировки . . . . .                                                     | 137 |
| Глава VIII. Основы теневого метода . . . . .                                                                             | 151 |
| Глава IX. Измерение кривизны инструмента и изделий . . . . .                                                             | 183 |
| Глава X. Исследование вогнутых сферических и плоских зеркал . . . . .                                                    | 202 |
| Глава XI. Исследование несферических зеркал . . . . .                                                                    | 224 |
| Глава XII. Изготовление и исследование преломляющей оптики . . . . .                                                     | 243 |
| Заключение (оно же и предисловие) . . . . .                                                                              | 269 |



## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДКОЛЛЕГИИ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Советские астрономические обсерватории оснащаются новыми мощными телескопами. Достаточно указать на 2,6-метровые рефлекторы ЗТШ в Крымской и ЗТА в Бюраканской астрофизической обсерватории и, конечно, на крупнейший в мире 6-метровый телескоп БТА в Специальной астрофизической обсерватории АН СССР. Отечественная стекловаренная и оптическая промышленность достигли больших успехов. Освоены новые сорта стекол для линз, пирекс и ситалл для зеркал, кварц — для тех и других. Разработаны и применяются новые прогрессивные методы изготовления и контроля астрономической оптики. Тем не менее, замечательная книга Д. Д. Максудова «Изготовление и исследование астрономической оптики», изданная в 1948 году и являющаяся продолжением недавно переизданной его известной книги «Астрономическая оптика» (2-е изд. — Л: Наука, Ленингр. отд., 1979) не потеряла своего значения.

Книга Д. Д. Максудова — это прежде всего изложение личного опыта и личных достижений нашего выдающегося оптика, в оригинальном тексте автора нет даже обычного списка литературы, да и в тексте ссылки на другие исследования весьма немногочисленны. За прошедшие десятилетия техника и технология ушли вперед, но каждый современный специалист в этой области должен знать эти золотые крупицы опыта, как современный юнга, который будет служить на атомном ледоколе или подводной лодке, обучается искусству ходить под парусами. Написанная простым и ясным языком, без сложных математических формул и оставляя за рамками многие сложные физические и химические явления, связанные с процессами изготовления и исследования астрономической оптики, она будет полезна и квалифицированному оптику профессионалу и любителю телескопостроения.

В этой книге Д. Д. Максудов рассматривает в основном методы, разработанные им самим и широко применявшиеся им. Большой опыт автора, его мастерство в изготовлении первоклассной астрономической оптики списали ему уважение среди оптиков и астрономов. Необходимо отметить строгость Д. Д. Максудова к качеству оптики, будь это точность обработки поверхности или качество заготовки. Эти требования казались одно время астрономам завышенными. Астрономы обосновывали свое мнение влиянием атмосферы и низкой разрешающей способностью фотоэмульсии. Однако строительство телескопов в условиях хо-

рошего астроклимата, а тем более вынос их за пределы атмосферы путем установки на космических аппаратах часто требует дифракционного разрешения. С другой стороны, хорошо зная сложность изготовления астрономической оптики, Д. Д. Максудов реально оценивает вредность тех или иных ошибок. Так, например, он показывает, что свили не всегда так вредны, как это считают астрономы.

В книге обстоятельно рассмотрены материалы, применяемые в астрономической оптике, и их свойства, методы крепления оптических деталей в телескопе, процессы шлифовки и полировки и рекомендуемая для этого кинематика станков. Особое внимание Д. Д. Максудов уделяет методам контроля и исследования астрономической оптики. Ведь Д. Д. Максудов является изобретателем компенсационных методов исследования деталей оптических систем в целом и пионером в использовании этих методов. Он значительно усовершенствовал теневой метод Фуко исследования вогнутого волнового фронта и этому вопросу уделено значительное место в книге. Другие методы (интерференционные, Гартмана и пр.) в книге не затронуты, так как Д. Д. Максудов их использовал редко, считая их сложными и не контрольными, а лишь аттестационными. В последние годы эти методы сильно развились и появилась возможность оперативного использования их в ходе изготовления оптических деталей. Не имея возможности внести в авторский текст какие-либо изменения или дополнения или дать подробные дополнения в подстрочных примечаниях, редколлегия прилагает список дополнительной рекомендуемой литературы.

#### СПИСОК РАБОТ Д. Д. МАКСУТОВА ПО МЕТОДАМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

1. Анаберрационные отражательные поверхности и системы и новые способы их испытаний.— Тр. ГОИ, 1932, вып. 88, 120 с.
2. Исследование нескольких объективов и зеркал по методу фокограмм.— ЖОМП, 1932, № 2, с. 8.
3. Испытание текучести полировальных смол.— ЖОМП, 1932, № 4, с. 10.
4. Исследование диска крон  $\varnothing 850$  мм на свили и неоднородности.— ЖОМП, 1932, № 10, с. 7.
5. Новый количественный метод теплового испытания объективов и зеркал.— ЖОМП, 1932, № 11, с. 11.
6. Работы ГОИ по астрономической оптике. Изложение доклада на первом Всес. астрономо-геодезическом съезде.— ЖОМП, 1934, № 3, с. 19.
7. Тепловые методы исследования оптических систем.— Пробл. новейшей физики, 1934, вып. 23, 172 с.
8. Оптические плоскости, их исследование и изготовление.— Л.: Издат ВООМПа, 1934, 88 с.
9. On the temperature coefficient of the focal distance of an object-glass.— Цирк. ГАО в Пулкове, 1936, № 20, с. 37.
10. Из практики лаборатории астрономической оптики.— ЖОМП, 1937, № 4, с. 17.
11. Сотовые зеркала из сплавов алюминия.— ЖОМП, 1937, № 3, с. 1.
12. Советская астрономическая оптика. Итоги и перспективы.— ЖОМП, 1937, № 11, с. 8.

13. Метод наклонных лучков для исследования формы плоскостей и цилиндров.— ЖОМП, 1939, № 5, с. 6.
14. Тепловой метод и его возможности.— ЖОМП, 1941, № 5, с. 3.
15. Над чем и работал.— ЖОМП, 1941, № 3, с. 5.
16. Новая методика исследования формы зеркал крупных телескопов.— Изв. ГАО, 1957, № 160, с. 5.
17. Устройство для измерения радиусов кривизны больших поверхностей.— Авт. свид. № 34190, кл. 42h, 35; 7.12.1932.
18. Параболический коллиматор и способ его изготовления.— Авт. свид. № 49538, кл. 42h, 8; 29.4.1936.
19. Способ центровки стекол объектива.— Авт. свид. № 49374, кл. 42h, 35<sub>01</sub>; 29.4.1936.
20. Устройство для измерения радиусов кривизны вогнутых сферических поверхностей.— Авт. свид. № 61545, кл. 42h, 34<sub>13</sub>; 26.10.1940.
21. Осветительное устройство для исследования по тепловому методу Фуко.— Авт. свид. № 61544, кл. 42h, 35<sub>01</sub>; 27.10.1940.
22. Способ исследования бесформенных кусков стекла на свили.— Авт. свид. № 67168, кл. 42h, 35<sub>01</sub>; 10.12.1940.
23. Способ изготовления концентрических или близких к ним менисков.— Авт. свид. № 64492, кл. 42h, 1<sub>01</sub>; 67a, 19; 12.12.1941.

# СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО МЕТОДАМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ КРУПНОЙ ОПТИКИ

## I. Технология обработки стекла и оптические материалы

1. Бардин А. И. Технологии оптического стекла (специальная обработка оптических деталей).— Промстройиздат, 1953, 157 с.
2. Бобашов В. В. Влияние кинематики станка и конфигурации инструмента на формирование несферических поверхностей в процессе шлифования и полировки.— ОМП (Оптико-механическая промышленность), 1976, т. 43, № 1, с. 17.
3. Бужинский И. М., Даниленко В. А., Степанов С. Е. Стекло и ситаллы для астрономического приборостроения.— В кн.: Новая техника в астрономии (НТА), вып. 3.— Л.: Наука, 1970, с. 202.
4. Бужинский И. М. Оптические материалы для астрономии.— В кн.: Новая техника в астрономии, вып. 6.— Л.: Наука, 1972, с. 139.
5. Витриченко Э. А., Прохоров А. М., Трушин Е. В. Методы изготовления астрономической оптики.— М.: Наука, 1980, 196 с.
6. Кузнецов А. П., Чунин Б. А. Методы изготовления асферических поверхностей (обзор).— ОМП, 1976, № 5, с. 59.
7. Куманин К. Г. Несколько замечаний о строении поверхности полировальных.— ОМП, 1957, № 3, с. 38.
8. Леушина Т. М. Изготовление асферических поверхностей оптических деталей с использованием многоэлементных инструментов (обзор).— ОМП, 1975, № 4, с. 57.
9. Механическая шлифовка поверхностей. Пять теорем Деве.— ОМП, 1937, № 2, с. 16; № 5, с. 7; № 6, с. 6.
10. Мизнев Р. А. Основные прототипы создания станков для обработки оптических деталей по управляемым процессам формообразования.— ОМП, 1971, № 7, с. 53.
11. Мизнев Р. А., Штандель С. К. Оборудование оптических цехов.— М.: Машиностроение, 1981, 367 с.
12. Ошурко В. В. Обработка и результаты предварительных исследований главного зеркала 2,6 м для телескопа КрАО.— Сб. НТА, вып. 1, 1961, с. 16.
13. Пономарев Н. Г. Новый метод изготовления стеклянных дисков астрономических зеркал.— Бюл. АН, 1934, № 36, с. 271.

14. *Прияшников В. П.* Система кремнезема.— Изд. лит. по строительству, 1971, 239 с.
15. *Семибратов М. П.* Создание управляемых процессов шлифовки и полировки оптических поверхностей.— ОМП, 1958, № 9, с. 37.
16. *Семибратов М. П., Зубаков В. Г., Штандель С. К., Кузнецов С. М.*, Технологии оптических деталей.— М.: Машиностроение, 1978.
17. Технологии обработки оптических деталей/Под ред. М. Н. Семибратова.— М.: Машиностроение, 1975, 207 с.
18. *Ходанов Г. С., Коровкин В. П., Альтшуллер В. М.* Физические основы тонкого шлифования стекла алмазным инструментом (обзор).— ОМП, 1980, № 9, с. 46.
19. *Шестаков В. А., Степанов С. Е., Вужинский Н. М., Сияков В. Ф.* Организация работ по изготовлению главного зеркала БТА.— ОМП, 1977, № 3, с. 55.
20. *Apsden R., McDonough R., Nitchie F. R.* Computer assisted optical surfacing.— Appl. Opt., 1972, v. 11, № 12, p. 2739.
21. *Bayle P.* Surfageage du miroirs ESO de 3,654 metres de diametre Ritchey-Chretien F/3.— Geneva: Proc. ESO/CERN Conf., 1971, p. 229.
22. *Bloxson J. T., Schroeder J. B.* Preparation of optical surfaces on beryllium.— Appl. Opt., 1970, v. 9, № 3, p. 539.
23. *Brown D. S.* The computer assisted figuring of large mirrors.— Geneva: Proc. ESO/CERN Conf., 1971, p. 273.
24. *Cooke Fr.* Making a 1,22 m diameter aluminum mirror.— Appl. Opt., 1965, v. 4, № 9, p. 1240.
25. *Couder A.* Application d'une deformation thermique intentionnelle a l'execution d'une surface parabolique.— CR, 1952, v. 235, p. 491.
26. *Cox A., Rayston M. P.* The manufacture of precision aspheric surfaces.— In: *Label, Proc. Conf. Opt. Instr. and Techn.*— London, 1961, p. 330.
27. *Jagdt R. L.* Fused silica lightweight mirror blanks.— IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1969, v. AES-5, № 2, p. 306.
28. *James T. E.* Measurement techniques used in the optics workshop.— Appl. Opt., 1966, v. 5, № 5, p. 695.
29. *Loytty E. Y., DeVoe C. F.* Ultralightweight mirror blanks.— IEEE Trans. on Aerospace and Electronics System, 1969, v. AES-5, № 2, p. 300.
30. *Noble H.* Motion of a mirror blank during the polishing process.— Boll. Inst. Tonantzintla, 1973, v. 1, № 1, p. 45.
31. *Schmidt F. J.* Electroforming of large mirrors.— Appl. Opt., 1966, v. 5, № 5, p. 719.
32. *Townsend P. D.* Ion beams in optics.— Opt. Techn., 1970, № 2, p. 65.

## II. Методы контроля астрономической оптики

33. Ряд статей в Изв. САО АН СССР, 1975, т. 7, 163—198; в кн.: ИТА № 6, 1979.
34. О применении разных методов контроля к 6-метровому телескопу БТА см. статьи в ОМП; 1977, № 3, с. 3; № 10, с. 3; 1977, № 12, с. 3; 1976, № 12, с. 3; 1976, № 12, с. 6; 1977, № 3, с. 55; ИТА № 6, 1979, с. 98; АЖ, 1980, т. 57, № 4, с. 869.
35. *Витриченко Э. А.* Методы исследования астрономической оптики.— Наука, 1980, 151 с.
36. *Горшков В. А. и др.* Автоматизированные методы контроля оптических поверхностей (обзор).— ОМП, 1980, № 2, с. 37.
37. *Лузопел И. И., Жданов Д. Д.* Интерферометры для контроля оптических поверхностей.— ОМП, 1971, № 7, с. 35.
38. *Лузопел И. И., Константиновская Н. В., Федина Л. Г.* Методы контроля формы асферических поверхностей вращения (обзор).— ОМП, 1975, № 7, с. 64.
39. *Иван Г.* Методы контроля оптических поверхностей.— М.; Л.: Гос. над. оборонной пром. 1939, 132 с.
40. *Креопилова Г. В., Пурлев Д. Т.* Исследование и контроль оптических систем.— М.: Машиностроение. 1978, 224 с.

41. Лукин А. В., Мустафин К. С. Голографические методы контроля асферических поверхностей (обзор).— ОМП, 1979, № 4, с. 53.
42. Орлов П. В. Контроль асферических поверхностей типа коррекционных пластин Шмидта (обзор).— ОМП, 1977, № 4, с. 55.
43. Пань Цзюнь-гуа. Новый метод исследования формы поверхности выпуклых вторичных зеркал телескопов.— Изв. ГАО, № 169, с. 123.
44. Попов Г. М., Попова М. Б. Методика расчета компенсатора Оффера для контроля вогнутых асферических зеркал.— Изв. КрАО, 1978, т. 58, с. 109.
45. Пурьев Д. Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей.— М.: Машиностроение, 1976, 262 с.
46. Романова М. Ф. Исследование параболических зеркал методом Гартмана.— Тр. ГОИ, 1927, т. 4, вып. 35, с. 1—77.
47. Ронки В. Испытание оптических систем.— М.: Л.: ГТТИ, 1933, 102 с.
48. Снежко Л. П. Анализ основ метода Гартмана.— Изв. САО, Астрофизич. исследования, 1981, т. 14, с. 3—14.
49. Соснина М. А. О компенсационном методе контроля асферических зеркал.— Изв. ГАО, 1958, № 162, с. 137.
50. Соснина М. А. О методе контроля крупных асферических зеркал.— Изв. ГАО, 1968, № 184, с. 135.
51. Barakat R. General diffraction theory of optical aberration tests, from the point of view of spatial filtering.— JOSA., 1969, v. 59, № 11, p. 1432.
52. Beck H. G. Die Entwicklung der Hartmann-Methode der Astro-Optikprüfung.— Astron. Abhandl., 1965, S. 16.
53. Cornejo A., Malacara D. Ronchi test of aspherical surfaces, analysis and accuracy.— Appl. Opt., 1970, v. 8, № 8, p. 1897.
54. Dall H. E.— In: Amateur Telescope Making. III.— N. Y.: Scient. Amer., 1953, p. 149.
55. Hindle J. H. A new test for Cassegrainian and Gregorian secondary mirrors.— MN RAS, 1931, v. 41, № 5, p. 592.
56. Kühne C. Über Methoden zur Prüfung astronomischer Optik.— Mitt. Astron. Ges., 1973, № 34, S. 43 (обзор).
57. Linfoot E. H. Recent advances in Optics.— Oxford Univers. Press, 1955, 287 p.
58. Malacara D. et al. Bibliography of various optical testing methods.— Appl. Opt., 1975, v. 14, № 5, p. 1065 (501 назв.).
59. Mayall N. U., Vasilievskis S. Quantitative tests of the Lick observatory 120-inch mirror.— AJ, 1960, v. 65, № 5, p. 304.
60. Offner A. A null corrector for paraboloidal mirrors.— Appl. Opt. 1963, v. 2, № 2, p. 153.
61. Philbert M. Procédé analogique associe a la methode de Foucault pour la determination rapide du profil d'une surface d'onde par voie electronique.— Optica Acta, 1967, v. 14, № 2, p. 169.
62. Simon M. C., Simon J. M. Testing of flat optical surfaces by the quantitative Foucault method.— Appl. Opt., 1978, v. 17, № 1, p. 132.

## ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Оптическая техника имеет дело с такими точностями и допусками на изготовление, каких, в общем, не знают другие области техники. Если рядовому токарю приходится выдерживать допуски в десятые или сотые доли миллиметра, то рядовому оптику в обычном серийном производстве приходится выдерживать допуски в десятые и даже сотые доли микрометра. Объясняется это тем, что оптические допуски связаны с волновой природой света: для того, чтобы оптический прибор давал изображение безупречного качества, необходимо, чтобы деформации фронта световой волны (полновые абберации) не превышали четверти длины световой волны ( $1/4\lambda$ ). Это условие было выведено Рэлеем применительно к визуальным оптическим системам и называется условием Рэлея.

Так как длина световой волны для желто-зеленых лучей, к которым глаз наиболее чувствителен, равна  $\lambda_0 = 0,555$  мкм, то допуск  $h_{\max}$  на волновые абберации в первоклассных визуальных системах равен

$$h_{\max} = \frac{\lambda_0}{4} = 0,14 \text{ мкм.} \quad (1)$$

В соответствии с этим основным в оптике допуском на волновые абберации можно вычислить допуски на ошибки формы поверхностей оптических изделий, причем эти допуски будут различными для преломляющих и отражающих поверхностей, для нормального и наклонного падения лучей и для оптических сред с различными показателями преломления  $n$ . Рассмотрим этот вопрос в общем виде, обратившись к рис. 1.

Пусть неискаженный фронт волны  $I-I$ , распространяясь в первой среде с показателем  $n_1$ , падает на поверхность  $AB$  раздела со второй средой с показателем преломления  $n_2$ ; пусть поверхность раздела имеет местную ошибку, высота (или глубина) которой равна  $\Delta$ ; пусть угол падения для фронта  $I-I$  равен  $\alpha$ .

В этом случае часть энергии отразится под тем же углом  $\alpha$  в виде фронта волны  $I'-I'$ , который приобретет в соответствующем месте деформацию  $h'$ , а часть энергии преломится и будет распространяться в среде с показателем преломления  $n_2$  под углом преломления  $\beta$  в виде волнового фронта  $II-II$  с соответственной местной деформацией  $h_2$ ; причем, как это следует

из закона преломления,

$$\sin \alpha : \sin \beta = n_2 : n_1.$$

Пусть между второй и третьей средой с показателем  $n_3$  имеется недеформированная поверхность раздела  $CD$  и пусть волновой фронт  $II-II$  падает на эту поверхность под углом падения  $\gamma$ . Тогда в третьей среде световая энергия будет распространяться под углом преломления  $\delta$  в виде волнового фронта

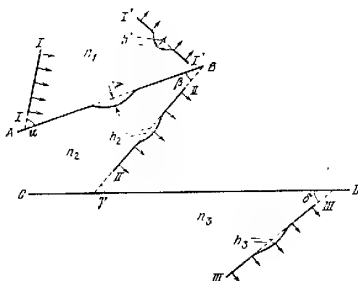


Рис. 1.

$III-III$  с соответственной местной деформацией  $h_3$ ; в этом случае, очевидно,

$$\sin \gamma : \sin \delta = n_3 : n_2.$$

Не приводя здесь геометрических выводов, дадим значение деформаций  $h_2$ ,  $h_3$  и  $h'$  в окончательном виде; оказывается, что

$$h_2 = \Delta \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha} = \frac{\Delta}{n_2} \left( \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha} - n_1 \cos \alpha \right); \quad (2)$$

$$h_3 = h_2 \frac{n_2}{n_3} = \frac{\Delta}{n_3} \left( \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha} - n_1 \cos \alpha \right); \quad (3)$$

$$h' = 2\Delta \cos \alpha. \quad (4)$$

Выражение (4) можно выводить, как частный случай, из выражения (2), приняв для случая отражения  $n_2 = -n_1$ .

При нормальном падении ( $\sin \alpha = 0$ ;  $\cos \alpha = 1$ ) наши формулы упрощаются и принимают вид

$$^0h_2 = \Delta \frac{(n_2 - n_1)}{n_2}; \quad (5)$$

$$^0h_3 = \Delta \frac{(n_2 - n_1)}{n_3}; \quad (6)$$

$$^0h' = 2\Delta. \quad (7)$$

Приведенные формулы позволяют нам решать задачи о допусках в любых практических случаях.

**Пример 1.** Дана прямоугольная призма полного внутреннего отражения (рис. 2); предполагается, что катеты ошибок не имеют, и требуется вычислить допустимую ошибку  $\Delta_{\max}$  на гипотенузе призмы, если показатель преломления призмы  $n = 1,5$ .

Рассуждаем так: плоский фронт  $I-I$  пойдет без искажения в вещество призмы; после отражения на гипотенузе он приобретет деформацию  $h'$ , определяемую по выражению (4), в котором  $\alpha = 45^\circ$ ; находим эту величину:

$$h' = 2\Delta \cos 45^\circ = 1,4\Delta;$$

далее фронт волны, получивший такую деформацию, падает нормально на второй катет и, выходя в воздух, приобретает окончательную деформацию  $h_2$ , которую вычисляем по формуле (3), приняв  $n_2 = 1,5$ ;  $n_1 = 1$ ;  $h_2 = h'$ :

$$h_2 = 2,1\Delta. \quad (8)$$

По по условию Рэлея (если призма предназначена для перпендикулярного визуального прибора) деформация  $h_2$  не должна превышать  $1/4\lambda_0$ , или 0,14 мкм; поэтому наш допуск на местные ошибки поверхности гипотенузы будет

$$\Delta_{\max} = 0,067 \text{ мкм} = 0,12\lambda_0. \quad (9)$$

При пользовании методом пробного стекла в качестве контрольного метода, ошибке  $0,12\lambda$  соответствует смещение интерференционных полос на 0,24 интервала между соседними полосами, а потому оптик скажет, что ему нужно изготовить гипотенузу призмы с точностью до 0,24 полосы, т. е. приблизительно до  $1/4$  полосы.

**Пример 2.** Предположим, что в той же призме ошибка  $\Delta$  имеет место на одном из катетов, тогда как другой катет и гипотенуза имеют строго плоскую форму поверхностей. Если эта ошибка на первом катете, то распространяющийся в стекле фронт волны приобретает деформацию  $h_1$ , вычисляемую по формуле (5) в предположении, что  $n_1 = 1$  и  $n_2 = 1,5$ :

$$h_1 = \frac{\Delta}{3}.$$

После отражения от плоской гипотенузы деформация не изменится ( $h_2 = h_1$ ); наконец, по выходе фронта из призмы в воздух через второй плоский катет окончательная деформация  $h_2$  определится по формуле (3), в которой  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 1,5$ ;  $h_2 = h_1$ :

$$h_2 = \frac{\Delta}{2}. \quad (10)$$

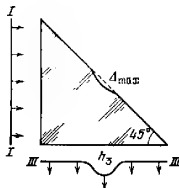


Рис. 2.



Эта величина не должна превышать допуска Рэлея (1), откуда

$$\Delta_{\max} = 0,28 \text{ мкм} = 0,5\lambda_0 = 1 \text{ полосе.} \quad (11)$$

Таким образом, в данной призме на катете можно допустить ошибку в  $\sim 4$  раза большую, чем на гипотенузе.

Если предположить, что первый катет точен, а ошибка  $\Delta$  имеет место на втором катете, то формула (5), в которой  $n_1 = 1,5$  и  $n_2 = 1$ , сразу же дает нам результат

$$h_2 = -\frac{\Delta}{2}, \quad (12)$$

отличающийся от результата (10) только обратным знаком. Это и понятно, так как по принятому нами правилу знаков ошибка  $\Delta$  положительна, когда она направлена в сторону хода лучей (распространения волны), и наоборот; таким образом, для первого катета положительной ошибкой является местная яма, а для второго катета — местный бугор.

Теперь можно сформулировать следующий вывод.

Во всех случаях преломляющих изделий (линз, призм или пластинок), когда падение лучей на их поверхности нормальное или близкое к нормальному, местная или зональная ошибка в виде углубления дает соответственную деформацию вышедшего в воздух фронта волны в виде возвышения, и наоборот; при этом безразлично, на какой из двух поверхностей изделия оказалась такая ошибка. Часто встречающаяся на практике ошибка технологического происхождения в виде «завала» поверхности на внешней зоне линзы обычно имеет место и на одной и на другой поверхности линзы, а потому такие две ошибки сложатся и приведут к двойному искажению волнового фронта. И если можно предположить, что местные (сосредоточенные) ошибки случайного происхождения, находящиеся на различных поверхностях линзы, редко складываются, что зональные ошибки на различных поверхностях могут складываться, но могут и вычитаться одна из другой, частично компенсируя друг друга, — то ошибки «завала края», как правило, будут складываться, а потому в отношении этого рода ошибок допуск (11) должен быть ужесточен вдвое для первоклассной линзы; то же самое, строго говоря, следовало бы делать и в отношении допуска на зональные ошибки, если высокое качество линзы должно быть гарантировано при любом расположении зональных ошибок на поверхностях линзы.

Но мы почти не знаем оптических приборов, состоящих из одиночной линзы. Простейший астрономический объектив состоит из двух линз и имеет четыре поверхности раздела «стекло — воздух». Для гарантии качества астрономического двухлинзового объектива следует ужесточить допуск на зональные ошибки для каждой из его поверхностей приблизительно в 4 раза против допуска (11), а так как одна из линз объектива сделана из флинта с показателем преломления 1,60—1,65, то в действительности нужно установить еще несколько более строгий допуск.

Действительно, если при  $n = 1,5$  мы имели  $h_2 = 0,5\Delta$ , то при  $n = 1,65$  нетрудно вычислить, что  $h_2 = 0,65\Delta$ , т. е. при той же ошибке поверхности волновая деформация увеличивается на 30%.

Мы видим, что каждая из четырех поверхностей линз объектива должна быть выполнена приблизительно с такой же точностью, что и поверхность одиночного зеркала, для которого, при падении лучей, близком к нормальному, допуск определяется по выражениям (7) и (1) в виде

$$\Delta_{\max} = \frac{\lambda_0}{8} = 0,07 \text{ мкм.} \quad (13)$$

Если же принять во внимание, что неоднородности оптического стекла, вызывающие дополнительные деформации волнового фронта, могут иметь место в обеих линзах объектива и складываться, и что строгие требования к однородности стекла растут вместе с размерами объектива, — то будет понятно, почему так дорого расцениваются и так трудно осуществляются крупные объективы по сравнению с крупными зеркалами, хотя бы и параболической формы.

Заставим лучи падать под различными углами падения  $\alpha$  на преломляющую или отражающую поверхность; определим по приведенным формулам допуск  $\Delta_{\max}$  как для случая преломления ( $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1,5$ ), так и для случая отражения ( $n_1 = 1$ ,  $n_2 = -1$ ); полученный результат изобразим на рис. 3 в виде двух кривых  $\Delta_{\max} = \varphi(\alpha)$ : сплошной — для случая преломления и прерывистой — для случая отражения; за единицу вертикального масштаба примем длину волны  $\lambda$ .

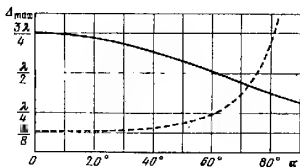


Рис. 3.

Заметим, что ординаты сплошной кривой на рис. 3 должны быть уменьшены в 1,5 раза, если световая волна выходит через какую-то точную оптическую поверхность из стекла в воздух.

Кривые  $\Delta_{\max}$  при преломлении и отражении имеют совершенно различный характер. В случае преломления с ростом  $\alpha$  приходится повышать требования к точности обработки поверхностей; при скользких, например, лучах нужно повысить точность поверхности приблизительно в 2,2 раза по сравнению со случаем нормально падающих лучей. В случае отражения с увеличением  $\alpha$  понижается необходимая точность обработки поверхности: поверхность может быть сделана сколь угодно грубой, когда  $\alpha$  стремится к  $90^\circ$ , а пучок — к скользкому по поверхности.

Этим объясняется, почему через полуматовую поверхность лучше видно напросвет при нормальном, а не при наклонном падении лучей, и почему грубо-матовая поверхность хорошо отражает предметы при скользком направлении падающих лучей.

Сделанные выводы могут быть использованы для «метода наклонных пучков» при исследовании матовых поверхностей, для иммерсионного метода контроля матовых заготовок стекла на свили и неоднородность, для метода ретуши асферических поверхностей в процессе их тонкой шлифовки и т. д.

В оптической практике имеются как «логкие», так и «тяжелые» случаи соблюдения необходимых допусков на местные ошибки поверхности. К числу легких случаев принадлежит не только плоское зеркало, работающее в лучах скользких или бликовых к скользким, но и внутренние поверхности в склеенных объективах. Пусть кроповая линза с показателем  $n_1 = 1,5$  склеена с флинтовой линзой с показателем  $n_2 = 1,6$  с помощью клеящего вещества с показателем  $n_3 = n_1 = 1,5$ . В этом случае поверхность кроповой линзы может быть выполнена сколь угодно грубо, так как все ее местные дефекты и углубления будут заполнены веществом с таким же показателем преломления. Для флинтовой линзы можно допустить такие ошибки  $\Delta$ , при которых деформация фронта волны по выходу в воздух будет не более  $1/4\lambda_0$ ; но

$$h = \Delta(n_3 - n_2) = 0,1\Delta,$$

откуда находим весьма грубый допуск

$$\Delta_{\max} = 1,4 \text{ мкм} = 2,5\lambda_0 = 5 \text{ полос.}$$

К числу трудных случаев принадлежат, с одной стороны, преломляющие приборы с очень большим числом линз, с другой стороны, зеркальные телескопы с двумя и, особенно, с тремя зеркалами.

Мы уже видели, что для полной гарантии качества прибора допуск на каждую из поверхностей получается путем деления ранее приведенных допусков на число действующих поверхностей, и если этих поверхностей много, то получающийся допуск может оказаться слишком строгим, и ни один из мастеров выдержать его не сумеет. Например, в некотором преломляющем визуальном приборе 20 поверхностей раздела воздух — стекло, а показатели преломления стекол близки к 1,5; тогда допуск (11)  $0,5\lambda_0$  придется делить на 20 и получить  $\Delta_{\max} = 0,025\lambda_0 = 0,05$  полосы; но с такой точностью оптик не сможет контролировать изделия методом пробного стекла, а если бы и мог, то изготовление прибора оказалось бы невероятно дорогим и длительным. Или другой пример: в телескопе три зеркала, они равноправны, работают полными отверстиями и одинаково трудны в изготовлении; в этом случае допуск (13) приходится делить на 3 и получить  $\Delta_{\max} = 0,04\lambda_0 = 0,08$  полосы, что также невероятно трудно осуществить, особенно, если принять во внимание крупные размеры астрономической оптики.

Сам собой напрашивается тот вывод, что во многих случаях оптического производства можно с успехом применить компенсационный метод, а именно: не добиваться необходимой высокой

точности каждой из поверхностей в отдельности, выполняя их по значительно более грубым допускам; затем собирать оптику по схеме будущего прибора, исследовать суммарную волновую aberrацию и компенсировать ее путем «ретуши» одной из поверхностей, осматривательно нами выбранной \*).

Но для такой технологии совершенно неприменим метод пробного стекла, способный контролировать только данную вещественную поверхность линзы, а не фронт выходящей из прибора волны. Кроме того, метод пробного стекла совершенно неспособен обнаружить неоднородности стекла, с своей стороны деформирующие фронт волны и снижающие качество изображения. Во многих случаях удается строить отличные оптические приборы из заведомо неоднородного стекла, применяя весьма деликатную и требующую высокого искусства местную ретушь поверхностей, компенсирующую неоднородности стекла. Для такой ретуши метод пробного стекла также совершенно неприемлем и должен быть заменен каким-то другим более совершенным; таким методом, как мы увидим ниже, является теневой метод исследования. Приведем два примера.

В 1933 или 1934 гг. в Государственном оптическом институте, в руководимой мной лаборатории делался со специальной исследовательской целью объектив Ø 200 мм из заведомо неоднородного стекла. Пока поверхности объектива имели точную сферическую форму, изображение светящейся точки в объективе представлялось в виде крупного пятна причудливой овальной формы с отдельными световыми выступами и хвостами. Под контролем теневого метода мы начали выполнять ретушь на одной из поверхностей этого объектива; так как неоднородности были сосредоточены преимущественно на внешних зонах объектива (результат плохого отжига стекла), ретушь состояла главным образом в том, что мы с помощью маленьких полировальничков искажали сферическую поверхность линзы на внешних зонах объектива. Рис. 4 характеризует качественно топографию такой ретушированной поверхности или вид интерференционных колец, если бы мы наложили на эту поверхность пробное стекло.

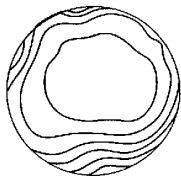


Рис. 4.

После ретуши объектив стал давать вполне хорошее изображение, но при единственном условии, что линзы сложены в стро-

\*) Это справедливо лишь для визуальных, сравнительно тонких линзовых объективов с небольшим полем зрения. В системах телескопов с большим полем или с большими расстояниями между оптическими поверхностями (например, в рефлекторах Ричи — Кретьена), каждая из поверхностей должна быть выполнена с расчетной точностью, так как компенсации ошибок для объекта, находящегося на оптической оси, не обеспечивает компенсацию для объектов, удаленных от нее. (Прим. ред.)

го определенном положении; стоило повернуть одну линзу относительно другой на небольшой угол, как достигнутая компенсация нарушалась и качество изображения катастрофически портилось.

Другой пример: зимой 1940—1941 гг. в той же лаборатории ретушировались очень крупные призмы для большого спектрографа, предназначенного для наблюдения солнечного затмения 1941 г. Призмы были изготовлены из очень хорошего по светопропусканию увиолевого флинта, но стекло оказалось в значительной степени неоднородным, а потому, при плоских поверхностях призм, изображение спектральных линий было ниже всякой критики. Каждую призму мы ретушировали, искажая местной полировкой одну из ее плоскостей до тех пор, пока изображение спектральных линий не оказалось хорошим.

Таким образом, искусный оптик, вооруженный надлежащей контрольной методикой, не только может воздерживаться от нанесения ошибок в пределах установленных выше допусков, но и напосылать сознательно местные и зональные ошибки с целью компенсации обнаруженных дефектов волнового фронта. Эти искусственные ошибки могут измеряться несколькими микрометрами, и чем они больше, тем труднее ретушь; но смысл ретуши состоит в том, что, во-первых, она осуществляется с точностью  $\lambda(n-1)$  для преломляющей поверхности и с точностью  $\frac{\lambda}{8}$  для

поверхности отражающей, т. е. как для одиночной поверхности, а во-вторых, ретушь позволяет устранить такие дефекты, которые неустраняемы при сферических поверхностях; последнее относится не только к неоднородностям стекла, но и к остаточной сферической абберации, которую оптик-вычислитель, оперирующий со сферическими поверхностями, устранить не имеет возможности; поэтому объектив, выполненный искусным оптиком, может оказаться лучше, чем это предусматривал расчет вычислителя.

Как же достигаются такие высокие точности на практике, и не является ли работа оптика искусством, граничащим с колдовством?

Известно, что многие вещи кажутся нам непостижимо трудными только потому, что мы далеко от них стоим или слышим о них со стороны. Известно также, что большинство профессионалов склонно окружать свою профессию ореолом тайны, а свое мастерство представлять в виде искусства, требующего особой одаренности. Но как ни приятно пребывать на высоком пьедестале, приходится во многих случаях развешать такие представления. Не представляет в этом смысле исключения также и оптическая техника, что мы и стараемся сейчас объяснить.

Если взять два кирпича с грубыми неправильными поверхностями, а затем терпеливо тереть их один о другой, пока две поверхности не притрутся друг о друга, то получившиеся поверхности — одна, быть может, слегка выгнутая, тогда как другая слегка вогнутая той же кривизны, — окажутся значительно

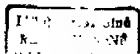
более точными, чем если бы мы вздумали их проточить резцом на хорошем станке. Для такой работы не требуется ни квалификации, ни оборудования, а успех объясняется тем, что для обработки поверхностей был применен замечательно удачный и выгодный «метод притирки».

При произвольных перемещениях одной поверхности по другой только две сферические поверхности одинаковой кривизны (одна выпуклая, а другая вогнутая, в частности, две плоскости) остаются в соприкосновении всеми своими точками. Пока трущиеся поверхности не приобрели сферической формы одинаковой кривизны, будут иметь место выступающие точки, участки или зоны, на которых срабатывание будет происходить быстро до тех пор, пока эти участки не снизятся до уровня сферы. Углубленные участки поверхности не срабатываются при такой обработке, а потому они ждут своей очереди, когда уровень сферической поверхности опустится до них. В результате первыми сошлифуются наиболее выступающие точки поверхности, затем значительная часть поверхности окажется отшлифованной, но на ней останутся необработанными отдельные углубленные площадки неправильных контуров; наконец, уровень сферы снизится до дна самой глубокой площадки, и поверхность окажется вполне отшлифованной или притертой к другой поверхности той же кривизны. Так как плоскость представляет собой частный случай сферы с нулевой кривизной, то притирка или шлифовка плоскостей в этом смысле ничем не отличается от шлифовки сферических поверхностей.

Если бы две притираемые друг к другу сферы имели различные кривизны, то между ними было бы обязательно соприкосновение либо в центре, либо на внешней зоне; но тогда срабатывание поверхностей происходило бы неравномерно до тех пор, пока обе поверхности не приобрели бы одинаковую кривизну.

Кирпич — материал весьма хрупкий, и его частицы на выступающих участках легко выкрашиваются при сухой притирке одного кирпича к другому. Если бы мы применили тот же рецепт к шлифовке стекла, то работа затянулась бы на неопределенно долгое время, а прежде гладкие поверхности оказались бы испорченными изуродованными большим числом глубоких царапин. Поэтому для значительного ускорения процесса притирки и для получения равномерно матовой поверхности применяются шлифующие порошки (абразивы) различной крупности зерна. Для еще большего ускорения шлифовки и для охлаждения обрабатываемого изделия вместо сухой шлифовки применяется мокрая: на воде — для стекол, на керосине — для стали и т. д.

После такой шлифовки если поверхности и не оказываются строго сферическими, то их ошибки будут измеряться долями размера шлифующего зерна данного номера абразива. А так как тонкая последняя шлифовка производится наждаком, размеры зерен которого измеряются несколькими микрометрами, то отшлифованная и подготовленная к полировке поверхность ока-



зывается сферической с микроинной точностью даже в руках опытного мастера. Если же мастер умеет управлять процессом шлифовки и знает, какой режим благоприятствует получению точной сферы, а какой режим способен испортить сферу, — то отшлифованная поверхность может оказаться сферической с точностью до долей световой волны, т. е. первоклассной оптической поверхностью. В дальнейшем необходимо приложить старания, чтобы не испортить такой поверхности в процессе ее полировки, так как практика показывает, что поверхность при бесконтрольной обработке после тонкой шлифовки оказывается более точной, чем после полировки. Понятно, что все эти рассуждения относятся к форме «макроповерхности» изделия, а не к форме его «микроповерхности», которая получается «оптической» только после полировки.

Мы увидели сейчас, как сам метод обработки — метод притирки — идет нам навстречу и позволяет с простейшими средствами получить если и не строго сферическую, то во всяком случае весьма к ней близкую поверхность. Поэтому, когда перед оптиком ставится задача получения асферических (т. е. несферических) поверхностей, он может и не справиться с этой задачей, если асферичность поверхности, т. е. ее отклонение от ближайшей сферы, превосходит некоторый предел, устанавливаемый практикой. В этом случае оптик прежде всего извлекает из арсенала своего опыта все приемы «как не следует полировать» и выбирает из них такие, которые ведут к появлению у изделия необходимых теперь ошибок: явно преувеличенная или преувеличивая «длину штриха» при шлифовке, а также делая местную «подрезку» смолой полировальники, оптик может умышленно и в нужном направлении исказить сферическую поверхность на небольшую, впрочем, величину. Поэтому изготовление слабовыраженных асферических поверхностей не представляет для оптика непреодолимых трудностей, если только он обеспечен надлежащим контрольным методом. Но если заданная асферичность достаточно велика, то такой непорочной полировки будет недостаточно и придется придумывать новые искусственные приемы для деформирования сферы, прибегая к помощи маленьких шлифовальников и полировальников особой формы и ведя обработку (ретушь) поочередно на различных зонах. Наконец, когда асферичность превосходит некоторый предел, обусловленный размером изделия, принятой методикой и искусством мастера, — изготовление асферической поверхности с оптической точностью оказывается невозможным.

Вот почему изготовление сферической оптики, даже массовое, сравнительно просто, и вот почему так сложно изготовление, хотя бы и уникальное, оптики асферической.

Рассмотрим в виде примера случай параболических зеркал среднего размера. Пока относительное отверстие зеркала не велико ( $1:7$ — $1:10$ ), изготовление такого зеркала не труднее и не легче изготовления сферического зеркала, так как требуемые в

этом случае деформации сферы для ее преобразования в параболоид того же порядка, что и возможные технологические ошибки, с которыми мы боремся при изготовлении сферы. Изготовление параболоида с относительным отверстием 1:5—1:4 требует применения некоторых искусственных приемов полировки и достаточного опыта мастера. Всякое дальнейшее повышение относительного отверстия сопряжено с все большими трудностями и затратами времени и требует все более и более высокого искусства от оптика, так как асферичность параболического зеркала пропорциональна кубу его относительного отверстия. Наконец, параболоид с относительным отверстием 1:2 при средних размерах его поперечника, — это, по-видимому, предел, достижимый для наиболее искусных мастеров и при неоправдывающих себя затратах труда и времени \*).

Для зеркал более светосильных, как, например для проекторных зеркал, приходится в корне изменить методику обработки; вместе с тем приходится отказаться от метода притирки поверхности изделия к поверхности инструмента, автоматически обеспечивающего плавность обрабатываемой поверхности, и ожидать резкого снижения точности изделия. В проекторных зеркалах мы смело можем на это пойти, так как их точность может быть ниже точности астрономических зеркал приблизительно по столько раз, во сколько диаметр кратера вольтовой дуги больше диаметра дифракционного кружка, т. е. приблизительно в 1000 раз.

В поисках оптических систем, близких к идеальным, мы можем как угодно усложнять оптическую схему, применяя большое число линз или зеркал и придавая некоторым из поверхностей асферическую форму; это позволит уменьшить или устранить сферическую абберацию, а в некоторых случаях и абберации наклонных лучей, т. е. рассчитать системы большого относительного отверстия, малого габарита, большого диаметра и с широким полем зрения. Но отлично получающаяся в расчете система может оказаться совершенно персальной, несущественной на практике главным образом из-за применения в ней асферических поверхностей. Поэтому вполне естественно стремление авторов оптических систем избегать применения асферических поверхностей не только в приборах массового производства, но и в уникальных приборах: тем и хороши «мепниковские системы», что в них с помощью сферической оптики удается исправить абберации, а весьма малые остаточные абберации полностью устранить, если это нужно, путем незначительной и не представляющей труда ретуши.

---

\*) Современная техника изготовления крупных асферических поверхностей и методы контроля развились настолько, что стало возможным изготовление первоклассных современных асферических зеркал диаметром до 2,5 м, обеспечивающих дифракционное качество изображения. (Прим. ред.)



Мы достаточно полно рассмотрели вопрос о точностях изготовления визуальных систем. Перейдем теперь к системам фотографическим.

Так как в условиях астрономических наблюдений глаз наиболее чувствителен к лучам длины волны  $\lambda_0 = 0,555$  мкм, а фотографическая нечувствительная пластинка — к лучам длины волны около 0,44 мкм, то следует ожидать, что фотографическая оптика потребует повышения точностей на  $\sim 25\%$  при равенство прочих условий в отношении числа линз, показателей преломления и т. д. В действительности это не так, во всяком случае для большинства практических случаев.

Возьмем идеальный безабберационный объектив и станем изменять его относительное отверстие  $A = D : f$ , где  $D$  — диаметр и  $f$  — фокусное расстояние объектива. В соответствии с этим звезда будет изображаться в фокальной плоскости в виде дифракционного кружка, окруженного слабыми дифракционными кольцами, причем диаметр дифракционного кружка

$$2r = \frac{2,44\lambda}{A} = 2,44V\lambda, \quad (14)$$

где  $V = \frac{1}{A} = \frac{f}{D}$  есть величина, обратная относительному отверстию. Составим табл. 1 диаметров ( $2r$ ) дифракционных кружков (в мкм) для различных относительных отверстий  $A$  и для двух длин волн  $\lambda_0 = 0,555$  мкм и  $\lambda = 0,44$  мкм:

$$[2r = \varphi(A, \lambda)].$$

Т а б л и ц а 1

| $\lambda$ \ $A$ | 1:1  | 1:2  | 1:3  | 1:10 | 1:20 | 1:50 | 1:100 | 1:200 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 0,555           | 1,35 | 2,71 | 6,77 | 13,5 | 27,1 | 67,7 | 135   | 271   |
| 0,44            | 1,07 | 2,15 | 5,37 | 10,7 | 21,5 | 53,7 | 107   | 215   |

При светосильных фотообъективах дифракционное изображение оказывается слишком мелким, чтобы фотографическая пластинка могла его обнаружить. Сравнительная грубость зерна пластинки, рассеяние света в фотографическом слое, переход реакции восстановления бромистого серебра от зерен, получивших засветку, к соседним незасвеченным зернам, — все это приводит к тому, что на обычных чувствительных слоях изображение звезды представляется в виде пятнышка с диаметром около 30 мкм, даже если бы оптическое изображение было точечным в математическом смысле слова; на малочувствительных пластинках предельные поперечники пятен почернения меньше 30 мкм, но такие пластинки не интересны для астронома, так как астрономические экспозиции даже при чувствительных фотопластинках обычно длятся от нескольких минут до многих часов.

Поэтому в светосильном астрофотографическом объективе, например, с относительным отверстием  $A=1:1$ , нет смысла добиваться выполнения условия Рэлея и получать совершенное изображение в виде дифракционного кружка диаметром 1,07 мкм (табл. 1), если фотографическое рассеяние все равно размажет этот кружок в пятно с диаметром  $\sim 30$  мкм в лучшем случае.

Анализируя таблицу, нетрудно почувствовать, что если при высоких относительных отверстиях (1:1, 1:2 или 1:5) дифракционные кружки на порядок меньше кружка фотографического рассеяния, а потому объектив можно готовить по заниженным допускам, то при малых относительных отверстиях (1:100, 1:200) соотношение становится обратным, и в этом случае фотопластинка фиксирует во всех деталях картину дифракционного изображения. Если мы не хотим ничего потерять в деталях такого изображения и извлечь из фотографического метода все, на что он потенциально способен, — мы должны ужесточить допуски на изготовление такой оптики на  $\sim 25\%$ , т. е. в отношении  $\lambda_0:\lambda = 0,555 \text{ мкм}:0,44 \text{ мкм}$  по сравнению с допусками на первоклассную визуальную оптику. Понятно, что здесь идет речь только о допусках на остаточную сферическую aberrацию, на местные и зопальные ошибки поверхностей и на неоднородности стекла, т. е. о допусках на факторы, деформирующие сферический фронт волны. В этом смысле светосильные фотообъективы вычисляются по заниженным допускам; в то же время светосильные фотообъективы в высшей степени чувствительны к ошибкам толщин линз и воздушных промежутков, к ошибкам кривизны поверхностей и к дефектам центрировки.

Если же принять еще во внимание, что в светосильных объективах, как правило, много линз и поверхностей раздела стекло — воздух, то допуски на их изготовление в действительности оказываются не слишком уж мягкими, а само изготовление достаточно трудным.

В то время как оценка качества визуального объектива определяется его волновыми aberrациями, — оценка фотографического объектива, в смысле качества изображения только на оси, должна определяться размерами кружка рассеяния в фокальной плоскости и распределением энергии в нем.

По объектив или иную фотографическую систему заданных диаметров, светосилы и конструкции можно рассчитать различным образом, получая кружки рассеяния различного диаметра и с различным распределением энергии в них. Этот вопрос интересно исследовать более подробно, и мы обратимся к примеру менисковой системы определенной конструкции и заданных светосилы и диаметра. Такую систему можно рассчитать, выполнив в ней условие минимума волновых aberrаций (наилучшее решение для визуальных систем); но можно рассчитать ее, выполнив условие достижения минимума кружка рассеяния.

Назовем эти два вида коррекции соответственно — коррекция № 1 и коррекция № 2; изобразим на рис. 5 угловые aberrации

или (что то же самое, хотя и в другом масштабе) поперечные aberrации для двух различным образом вычисленных систем, причем по оси абсцисс отложим поперечные (или угловые) aberrации, а по оси ординат — высоты зон объектива, начиная от центра и кончая внешней зоной.

Под кривыми aberrаций соответственно представим кривые распределения освещенности в изображении звезды, вычислен-

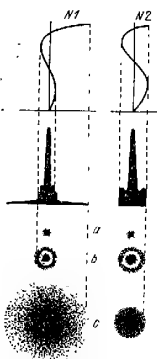


Рис. 5.

ные на основании чисто геометрических соображений; поэтому горизонтальный масштаб изображенных фигур связан с поперечными aberrациями, но не с размерами дифракционного изображения, а максимумы и минимумы кривых распределения освещенности не имеют ничего общего с дифракционными кольцами. В нижней части рисунка представлены изображения звезд (*a*, *b*, *c*) при различной экспозиции\*). Если время экспозиции очень мало или фотографруемая звезда слаба, то она оставляет на пластинке след *a* в виде кружка с деградированными краями и с диаметром около 30 мкм; звезда, оставляющая такой след, называется предельной для данных инструмента, времени экспозиции и чувствительности фотопластишки. Продолжим экспозицию и дадим возможность более низким уровням кривых распределения освещенности вызвать потемнение пластинки. Теперь мы получим изображения звезд в виде пятен *b*, причем для коррекции № 1 диаметр

пятна будет меньше, чем для коррекции № 2. Продолжим экспозицию так, чтобы получить потемнение от низких пологих веток кривой распределения № 1, и мы получим изображения с переэкспонированным центром, причем диаметр изображения для коррекции № 2 лишь немного увеличится за счет фотографического рассеяния, тогда как диаметр изображения для коррекции № 1 окажется значительно большим (приблизительно в 3 раза больше, чем для коррекции № 2).

Дальнейшее увеличение экспозиции приведет к плотному потемнению обоих изображений в пределах указанных диаметров с незначительным их приростом за счет фотографического рассеяния.

Анализируя приведенный материал, можно сделать следующие заключения:

\*) Здесь Д. Д. Максудов не учитывает влияние атмосферных помех. Их влияние рассмотрено им в книге: *Астрономическая оптика* 2-е изд.— М.: Наука, 1979, гл. 11. Однако наблюдения, выполняемые в последние годы из космоса, свободны от атмосферных помех. (Прим. ред.)

1. Для звезд, близких к предельным, коррекция № 1 несколько лучше коррекции № 2, так как приводит к меньшему размеру изображений с более контрастно обозначенным центральным ядрешком.

2. Для звезд более ярких, но еще достаточно близких к предельным, коррекция № 1, с одной стороны, лучше коррекции № 2, так как при ней пятно рассеяния получается меньше приблизительно на 20%; с другой же стороны, она хуже, так как при коррекции № 1 не вся энергия, а при коррекции № 2 вся энергия сосредоточена в пятне  $b$ .

3. Для достаточно ярких звезд коррекция № 2 во всех отношениях лучше коррекции № 1.

Поэтому мы склонны придавать фотографическим системам коррекцию № 2 или промежуточную между № 2 и № 1. Чтобы система оказалась хорошей фотографической системой, кружки рассеяния не должны превосходить 30 мкм в поперечнике, откуда абберации  $\eta$  не должны превышать предела

$$\eta_{\max} = \pm \frac{3100}{f} \text{ (секунд дуги)}, \quad (15)$$

где  $f$  — фокусное расстояние фотографической системы, выраженное в миллиметрах.

По-видимому, большинство существующих астрофотообъективов далеко не удовлетворяет этому требованию, так как изготовленные в руководимой мной лабораторией оптические системы с кружками наименьшего рассеяния, не превосходящими 30 мкм в поперечнике, получили исключительно высокую сравнительную оценку \*).

Конечно, дальнейший прогресс фотоматериалов заставит пересмотреть допуски на фотографическую оптику; при современном же качестве фотослоев в фотографических системах не следует допускать кружков рассеяния больше 30 мкм в поперечнике, независимо от того, что вызвало эти кружки: остаточная или расчетная сферическая абберация или дефекты обработки.

Существует мнение, будто бессмысленно добиваться в астрономическом инструменте первоклассного качества изображения, если атмосферное волнение все равно испортит изображения звезд. Это мнение не только не стимулирует прогресса теории астрономических инструментов и технологии их изготовления, но и пытается узаконить выпуск недоброкачественной продукции: оно выгодно оптическим фирмам, но никак не астрономам. К тому же это мнение совершенно неправильно.

Если атмосферное волнение и снижает качество изображения, то не всегда и не в одинаковой степени. В удачно выбранных районах могут иметь место такие периоды состояния атмосферы,

\*) Например, камера Шмидта с диаметром отверстия 14" = 356 мм Энгельгардтовской обсерватории под Казанью; или асферические объективы  $f = 100$  (1:1,2).

когда даже очень крупные инструменты способны проявить всю свою теоретическую разрешающую силу. Пусть эти периоды редки, но сделанные в это время немногочисленные наблюдения дороже большого числа посредственных наблюдений при плохих атмосферных условиях. Для проявления же теоретической разрешающей силы инструмент должен быть первоклассным, и не только в оптическом, но и в механическом отношении: одинаково плохи инструмент с чудесной механической montровкой при неудовлетворительном качестве оптики и инструмент с отличной оптикой на зыбком, например, штативе. Наконец, к искажению изображения в силу атмосферного волнения прикладывается постоянное слагаемое — искажение изображения, свойственное оптике данного инструмента; сумма же двух слагаемых больше каждого из них, а возможность компенсации в данном случае невероятна.

Поэтому мы будем задавать допуски на астрономическую оптику со всей строгостью, продиктованной теорией оптических инструментов; при этом для визуальных систем мы должны выполнять условие Рэлея  $\frac{1}{4} \lambda$ , а для систем фотографических можем допускать некоторые послабления в зависимости от их светосилы и свойств фотоматериала. Но, строго говоря, в фотографических системах также следовало бы выполнять условие Рэлея: такие фотографические системы никогда не устареют и переживут любые эволюции фотографических материалов.

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗЕРКАЛ

Первым инструментом, обогатившим и вооружившим науку, был телескоп линзовый, а не зеркальный, хотя теория зеркал более проста, а качество изображения в зеркальных инструментах должно быть более совершенным. Произошло это потому, что три с половиной века тому назад не было хорошего материала для зеркал и хорошей методики их обработки; линзы же типа очков были в то время уже как-то освоены в кустарном производстве, и кроме того, как мы знаем, их поверхности требуют меньших точностей изготовления по сравнению с зеркальными поверхностями.

Первым реально осуществленным зеркальным телескопом следует считать телескоп, собственноручно изготовленный великим Ньютоном в начале 70-х годов XVII столетия, когда линзовые телескопы имели уже более чем полувековую практику изготовления и использования. В то время и вплоть до середины XIX столетия материалом для зеркал служила зеркальная бронза — вещество большого удельного веса, недостаточной жесткости, трудное в обработке и нестойкое во времени в смысле отражающей способности зеркальной поверхности. Все же, свежееполированные зеркала того времени имели достаточный коэффициент отражения, несколько превышающий 60%, и были способны давать хорошие изображения, пока натяжения в металле, связанные с несовершенной технологией отливки и отжига, не деформировали оптической поверхности, часто до неузнаваемости. Такие зеркала сохранились до наших дней и позволяют сделать одно очень интересное сравнение: исследованное мною зеркало В. Гершеля приобрело причудливую форму поверхности, искаженную грубейшими местными и общими ошибками, какие трудно осуществить умышленно, даже применяя ретушь малыми полировальниками; в то же время более «древнее» зеркало Шорта (меньшего, правда, диаметра) достаточно хорошо сохранило параболическую форму поверхности. Отсюда приходится заключить либо о низком искусстве В. Гершеля как мастера-оптика, что не согласуется с его биографией и сделанными им астрономическими наблюдениями, либо о низком его искусстве как литейщика и металлурга, что более правдоподобно. По-видимому, Шорт обладал искусством не только отливать зеркальный металл, но и производить его старение, освобождая металл от натяжений и последующих деформаций. Поэтому Шорт оставил нам в виде своих зеркал документальное доказательство своего умения из-

готовились точные параболические зеркала, а В. Гершель такого доказательства нам не оставил.

В середине прошлого века Фуко и Штейнгейль предложили и осуществили почти одновременно и независимо друг от друга зеркала нового типа, сделанные из стекла с посеребренной отражающей поверхностью. Это ценное изобретение стало возможным лишь после изобретения Либихом химического способа серебрения, подоспевшего к тому времени.

Стеклоиные зеркала, при данных диаметре и толщине, не только легче бронзовых, но и значительно жестче, а потому они меньше деформируются от собственного веса при заданном способе их разгрузки. Серебряный фильм можно по желанию многократно смывать и снова наносить на отполированную оптическую поверхность стекла. Коэффициент отражения свежего серебра очень высок, и изображение в телескопе оказывается более ярким. В настоящее время с изобретением способа алюминирования отпадает даже необходимость в частых повторных серебрениях зеркал, так как алюминиевый слой сохраняет высокий коэффициент отражения в течение многих лет. Стекло полируется легче и лучше зеркального металла. Наконец, техника оптического стекловарения разработала методику «топкого» отжига стекла, а прозрачность стекла позволила применить оптические методы к наблюдению и измерению натяжений, появляющихся в стекле вследствие несовершенства отжига.

Изобретение стеклянных посеребренных с лицевой поверхности зеркал позволило осуществить зеркальные телескопы очень больших размеров. Был осуществлен телескоп с диаметром стеклянного зеркала  $2\frac{1}{2}$  м, сейчас готовится 5-метровое зеркало для обсерватории Маунт Паломар\*).

Но, отвергнув металлические зеркала, оптики недооценили одно замечательное их качество. Стекло является плохим проводником тепла, а потому, при неизбежных переменах температуры, в стекле возникают напряжения, а вместе с ними и деформации оптической поверхности. Пусть колебания температуры в течение ночи очень малы и, как их следствие, напряжения в стекле также очень малы, — но мы помним о строгости допусков на ошибки формы зеркальных поверхностей, а потому не будем удивляться, что для крупных зеркал существенны изменения температуры даже на десятые доли градуса.

Металлы по сравнению со стеклом обладают в десятки и сотни раз большей теплопроводностью, а потому, даже при значительных переменах температуры, металлические зеркала скорее успевают выравнять температуру во всей своей толще; поэтому в них не может возникать значительных температурных напряжений и деформаций поверхности.

\*) 5-метровый телескоп обсерватории Маунт Паломар вступил в строй в 1948 г. В 1974 г. вступил в строй советский телескоп БТА с главным зеркалом диаметром 6 м. В настоящее время он является крупнейшим телескопом в мире. (Прим. ред.)

Предположим, что металл обладает сверхпроводимостью тепла; тогда в каждый момент его температура равна температуре окружающего воздуха, и все линейные размеры и отрезки у зеркала — диаметр, толщина, радиус кривизны, фокусное расстояние — изменяются по закону:

$$l_{t_1} = l_t [1 + \alpha (t_1 - t)], \quad (16)$$

где  $l$  — линейный размер,  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения сверхпроводящего металла,  $t_1$  и  $t$  — последующая и предыдущая температуры воздуха. Охлажденное или нагретое зеркало в этом случае уменьшилось или увеличилось в масштабе, но не изменило геометрической формы поверхности: сфера осталась сферой, изменив лишь свою кривизну, парабола осталась параболой, изменив лишь свое фокусное расстояние.

Реальные металлические зеркала, если и не вполне, то достаточно строго следуют этому закону, и тем строже, чем выше их температуропроводность и чем меньше их толщина.

В случае стеклянных зеркал (рис. 6) при охлаждении или нагревании наружного слоя, незатрихованного на рисунке, срединный затрихованный массив стекла долго удерживает первоначальную температуру из-за низкой температуропроводности стекла; возникающие напряжения деформируют зеркало и изменяют кривизну его поверхности, однако не по закону (16), а по какому-то другому, более сложному, зависящему от кривизны верхней и нижней поверхностей, от характера соприкосновения зеркала с металлом оправы, от условий вентиляции верхней и нижней поверхностей зеркала, от упругости материала, от его коэффициента теплового расширения и т. д. По мы можем с некоторой вероятностью предвидеть следующее: точки  $a$  на внешней зоне находятся в более благоприятных условиях, чтобы осесть ниже общего уровня поверхности зеркала при падении температуры или выпячиваться выше этого уровня при повышении температуры. Таким образом в условиях переменной температуры стеклянное зеркало изменяет не только свою кривизну по закону, но поддающемуся точному учету, но и форму поверхности, и притом по преимуществу вблизи внешней зоны. Этот температурный эффект был назван оптиком-астрономом Ричи «эффектом края» зеркала.

Как бороться с эффектом края и как его спизить? В нашем распоряжении имеются следующие главные способы.

1. Уменьшить насколько возможно толщину зеркала. Но тонкое зеркало обладает малой жесткостью и сильно деформируется, как от внешних нагрузок при шлифовке и полировке на машине, так и от собственного веса в оправе телескопа. Поэтому для разгрузки такого зеркала, и на шлифовальной машине и в оправе телескопа, приходится применять очень сложные разгрузочные



Рис. 6.

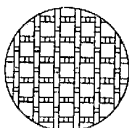


приспособления; в результате точная обработка поверхности зеркала становится исключительно трудной или даже невозможной, как и конструкция его оправы.

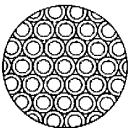
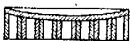
2. По можно оставить зеркало тонким, повысив его жесткость за счет ребер жесткости (метод, широко применяемый в машиностроении и других областях техники). Эти ребра жесткости можно было бы располагать по радиусам и концентрическим окружностям



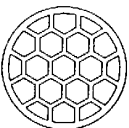
а



б



с



д

Рис. 7.

рис. 7, а), как это делал сто лет назад лорд Росс на своих шлифовальниках, надеясь пришить ту же конструкцию к зеркалам; или в виде перегородок, вставляемых между двумя листами стекла и образующих квадратные ячейки с отверстиями для вентиляции (рис. 7, б), как то делал не без некоторого успеха Ричи в начале нашего столетия; или в виде припеченных к стеклянному диску стеклянных трубок (рис. 7, с), по оригинальной системе акад. И. В. Гребенщикова, оробованной в лаборатории автора; или в виде сварной конструкции в форме пчелиных сот (рис. 7, д), оригинально разработанной Н. Г. Пономаре-

вым\*). Во всех этих случаях достигаются малые толщи стекла при высокой жесткости зеркала.

3. Кроме того, можно защищать зеркало телескопа от резких суточных изменений температуры, заключая на дневное перабочее время шпикую часть телескопа вместе с зеркалом в термостатическое устройство, в котором поддерживается средняя температура ночи. Так как колебания температуры за время ночи значительно меньше суточных колебаний и так как возможен прогноз температуры на ближайшую ночь, то за время длительной дневной «отстойки» зеркала можно подготовить его к наблюдениям предстоящей ночи так, что оно будет подвергаться воздействию сравнительно небольших изменений температуры.

4. По тем же соображениям следует осмотрительно выбирать место для постройки обсерватории с крупным рефлектором и пред-

\*) См. работы Пономарева Н. Г.: Цирк. ГАО АН СССР в Пулковск, 1935, № 15, с. 44; Zts. f. Instrumentenkunde, 1935, Bd. 55, № 7, S. 311; там же, 1936, Bd. 56, № 9, S. 379; Изв. ГАО АН СССР, 1945, № 134, с. 86. (Прим. ред.)

почитать пункты, статистически характеризующие малыми су- точными колебаниями температуры.

Каждая из этих мер позволяет уменьшить эффект края зеркала, но вряд ли более чем в 2—3 раза. Для достижения же существенного уменьшения эффекта края следует избрать другой, более действенный путь и в корне пересмотреть вопрос о выборе материала для зеркал. На этом трудном и мало исследованном вопросе мы сейчас и остановимся.

При изменении температуры окружающего воздуха тепло передается от одних точек материала зеркала к другим в силу теплопроводности материала. Но нас должна интересовать здесь не теплопроводность ( $\lambda$ ), а температуропроводность ( $q$ ) материала, т. е. способность его с большей или меньшей скоростью передавать изменения температуры от одних точек к другим. Температуропроводность ( $q$ ) прямо пропорциональна теплопроводности ( $\lambda$ ) и обратно пропорциональна удельной теплоемкости ( $C$ ) и плотности ( $d$ ) материала:

$$q = \frac{\lambda}{Cd}. \quad (17)$$

Чем выше температуропроводность материала зеркала, тем это выгоднее для зеркала, работающего в условиях переменной температуры, так как при равенстве остальных условий между некоторыми двумя избранными точками зеркала будет меньшая разность температур.

Такая разность температур заставит изменяться объемы элементов зеркала у этих точек в соответствии с величиной коэффициента теплового расширения ( $\alpha$ ) материала. Чем выше значение коэффициента  $\alpha$ , тем, естественно, это хуже для зеркала.

Стремление отдельных элементов зеркала изменить свой объем вызывает в материале напряжения, которые стремятся в свою очередь деформировать вещество зеркала, а вместе с тем и его оптическую поверхность. Но возникающим напряжениям противостоит упругость материала, для характеристики которой, по-видимому, следует в нашем случае брать модуль упругости ( $E$ ). Чем выше модуль упругости  $E$ , тем это выгоднее для зеркала.

Поэтому качество материала для зеркала в смысле уменьшения эффекта края может быть охарактеризовано некоторым коэффициентом:

$$\psi = \frac{Eq}{\alpha}, \quad (18)$$

где  $E$  — модуль упругости,  $q$  — температуропроводность и  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения материала зеркала.

Абсолютно ли точно предлагаемая мною формула или она требует некоторых корректив со стороны специалистов теории упругости, — но в первом приближении к истине ею во всяком случае можно пользоваться для оценки материалов для зеркал в смысле эффекта края.

В табл. 2 даны значения  $E$ ,  $q$ ,  $\alpha$  и  $\psi$  для различных материалов, расположенных в порядке убывания  $\psi$ . Необходимо сразу же заметить, что в различных справочниках приводятся либо границы, в которых заключены физические и механические константы веществ, либо заметно разнящиеся значения этих констант. Это и понятно, если даже не учитывать возможных погрешностей измерения констант: во-первых, небольшие примеси к

Таблица 2

|                   | $d$  | $E$    | $q$    | $\alpha$ | $\psi$ | $\psi'$ кро-<br>на=1 | $\psi''$ пи-<br>ренс=1 |
|-------------------|------|--------|--------|----------|--------|----------------------|------------------------|
|                   | 1    | 2      | 3      | 4        | 5      | 6                    | 7                      |
| Медь              | 8,6  | 10 000 | 1,15   | 165      | 70     | 176                  | 60                     |
| Серебро           | 10,5 | 7 000  | 1,72   | 195      | 62     | 156                  | 53                     |
| Ишвар             | 7,9  | 14 000 | 0,022  | 9        | 34     | 86                   | 29                     |
| Алюминий          | 2,7  | 7 500  | 0,84   | 230      | 28     | 70                   | 24                     |
| Сталь             | 7,7  | 24 000 | 0,13   | 110      | 25     | 63                   | 21                     |
| Плавильный кварц  | 2,2  | 6 200  | 0,0083 | 4        | 13     | 33                   | 11                     |
| Стекло ипрекс     | 2,25 | 6 200  | 0,0060 | 32       | 1,2    | 2,9                  | 1,0                    |
| Кроцглас          | 2,5  | 7,500  | 0,0042 | 80       | 0,39   | 1,0                  | 0,34                   |
| Тяжелый флинтглас | 4,4  | 5 000  | 0,0030 | 85       | 0,17   | 0,44                 | 0,15                   |

чистому веществу существенно изменяют  $\lambda$ , а вместе с тем  $q$  и  $\psi$ ; во-вторых, способ получения и способ холодной и термической обработки металлов заметным образом влияют на  $E$ ,  $d$  и другие константы, а вместе с тем и на  $\psi$ ; в-третьих, константы веществ в значительной степени зависят от температуры вещества. Чтобы навести некоторый порядок в этом вопросе, пришлось внимательно проанализировать материалы различных справочников \*) как в отношении чистоты, способа получения и способа обработки веществ для изготовления реальных зеркал, так и в отношении интервала температур, интересного для астрономов; затем пришлось усреднить и округлить полученные значения констант, допустив возможную погрешность в определении  $\psi$ , по-видимому, не превышающую 10% представленных в таблице величин. Замечу также, что в таблице не приведены размерности констант: для сравнительного исследования они нам и не нужны; важно лишь то, что они одинаковы для всех приведенных в каждом столбце значений и что константы отнесены приблизительно к одной и той же температуре, близкой к 0°.

В столбце 5 таблицы даны значения  $\psi$ , полученные в соответствии с выражением (18) и при использовании значений величин 2-го, 3-го и 4-го столбцов таблицы. Чем выше значение  $\psi$ , тем выгоднее соответствующий материал для зеркала в смысле уменьшения эффекта края.

\*) Наиболее полным и полезным оказался справочник Landolt, Börnstein.

Во второй половине прошлого века и в первой четверти настоящего астрономические зеркала делались (да и теперь часто делаются) из стекла типа кроунгласса. Примем для него  $s'f = f' = 1$  и сравним с ним остальные вещества таблицы в отношении эффекта края. Как это видно из столбца 6 таблицы, медное зеркало в данном смысле оказывается в 176 раз выгоднее зеркала стеклянного; инвар, несмотря на весьма малый коэффициент теплового расширения, оказался материалом вдвое менее выгодным по сравнению с медью ( $f' = 86$ ) по причине очень низкой температуропроводности; обыкновенная углеродистая сталь лишь немногим уступает инвару с точки зрения нашего критерия; плавленый кварц, которым особенно интересуется современная астрономическая оптика, почти вдвое уступает стали: подобно инвару, низкая температуропроводность кварца не окупается малым коэффициентом расширения; наконец, пирекс в  $\sim 3$  раза лучше, а тяжелый флинтгласс в  $\sim 2$  раза хуже обычного стекла типа кроунгласса.

В последнее время для зеркал наиболее широко применяются стекло пирекс. Приравняв для пирекса  $s''f = f'' = 1$ , составим столбец 7 таблицы и сравним таким же образом остальные материалы с пирексом.

Теперь к выбору материала для зеркала можно подойти значительно строже, чем это делалось раньше. Наиболее выгодными (в смысле эффекта края) материалами являются медь, а затем серебро; медь, кроме того, дешевле серебра, а потому ей следует отдать предпочтение. В моей лаборатории в 1940—1941 гг. были изготовлены не без некоторого успеха медные оптически зеркала: медная заготовка грубо шлифовалась и полировалась, затем гальванопластически покрывалась тонким слоем хрома, который в свою очередь шлифовался и полировался с оптической точностью, и мы получали зеркало, практически свободное от эффекта края \*).

\*) В настоящее время начинают применяться бериллий. У него  $d = 1,85$  г/см,  $E = 30\,000$  кг/мм,  $f$  относительно пирекса типа «316» составляет 127. Насколько известно редакции, наибольшим бериллиевым зеркалом диаметром 940 мм был оборудован космический телескоп GEP (см. *Mintz L. J., Jackson B. W.* — IEEE Trans., Aerosp. and Electr. Syst., AEG-5, № 2, p. 253, 1969). В СССР И. И. Крижановский предложил метод напеснения стеклянной пленки на бериллий (*Крижановский И. И.* — Авт. св. СССР № 327138; Бюлл. изобр. № 5, с. 57, 1972) с последующей шлифовкой и полировкой ее. Известен способ покрытия поверхности мягких металлов химически осажденным никелем (так называемый каниген), который хорошо шлифуется и полируется. Кроме того, разработаны стеклокерамические материалы (в СССР ситалл, в США — сервит и пирокерам, в ФРГ — деродур) практически с нулевым коэффициентом линейного расширения. Ряд телескопов диаметром до 4-х метров снабжен зеркалами из плавленого кварца и стеклокерамических материалов. Стекло пирекс в настоящее время выходит из употребления, но металлически зеркала широкого распространения пока не получили. Крупнейшими зеркалами из алюминия, покрытыми канигеном, оборудованы 1370-миллиметровый рефлектор обсерватории Милла — Мерато (Италия), 1500-миллиметровые рефлекторы обсерватории Пейн Стейт (США) и Сан-Педро Мартин (Мексика). (Прим. ред.)

Хорошие результаты были получены и со стальными зеркалами, которые таким же образом предварительно покрывались тонкой хромовой пленкой, защищающей металл от коррозии и позволяющей выполнить безупречную полировку зеркальной поверхности. Понятно, что для повышения коэффициента отражения отполированные хромовые пленки на стальных или медных зеркалах алюминировались затем обычным способом.

Нанесение на металл защитных и благоприятных для шлифовки и полировки хромовых пленок сильно осложняет производство и является операцией капризной, а потому наилучших результатов мы достигали, применяя для зеркала нержавеющей сталь с содержанием хрома около 13%; такое зеркало сравнительно легко обрабатывается (сначала резцом, а затем энтической шлифовкой), после полировки приобретает качество оптически точной и чистой поверхности, не требует защитных пленок и легко алюминировается. В отношении величины  $\psi$  нержавеющей сталь по-прежнему уступает обычной стали, но все же она в десятки раз выгоднее стекла и, во всяком случае, конкурирует с плавленым кварцем.

Значительный интерес в применении к астрономическим зеркалам представляют алюминий и алюминий-магнелиевые сплавы\*), так как они имеют большое  $\psi$  и малый удельный вес. К сожалению, не удается на практике использовать еще одно выгодное свойство алюминия и его сплавов — высокий коэффициент отражения. Дело в том, что даже наиболее благоприятные сплавы алюминия пока не удается отполировать с необходимой оптической «чистотой»: мельчайшие ячеики и паутина мельчайших царапин являются неизбежными спутниками полировки алюминиевых зеркал. Но алюминий, подобно другим металлам, можно покрыть тонкой хромовой пленкой, а затем эту пленку отшлифовать и отполировать с оптической точностью. Принципиальная возможность осуществления таких зеркал из алюминия была экспериментально показана в моей лаборатории О. В. Бердугиной в 1935 г.

Наконец, стекло, в свое время совершившее переворот в судьбе рефлекторов, обладает наиболее низкими значениями  $\psi$ ; стекло — это самый невыгодный с точки зрения температурных деформаций материал, какой только можно себе представить для астрономических зеркал.

Возродив идею возврата к металлическим зеркалам и экспериментируя с ними более 13 лет, я пришел к твердому убеждению, что со стеклянной оптикой невозможно осуществление высококачественного крупного зеркального инструмента и что будущее за металлическими зеркалами.

Идя одновременно по двум путям — увеличивая  $\psi$  материала для зеркал и уменьшая их толщину, мы приходим к новому типу

---

\*) Сплав АМгВІ с хромовым и никелевым покрытиями исследовал Ж. М. Лорецян (Сообщ. Бюраканской обс., 1967, вып. 38, с. 66). (Прим. ред.)

зеркал — к металлическим сотовым зеркалам. На рис. 8 изображена группа сотовых зеркал из нержавеющей стали и алюминиевых сплавов. Эти зеркала изготовлены в моей лаборатории в 1936—1937 гг.\*).

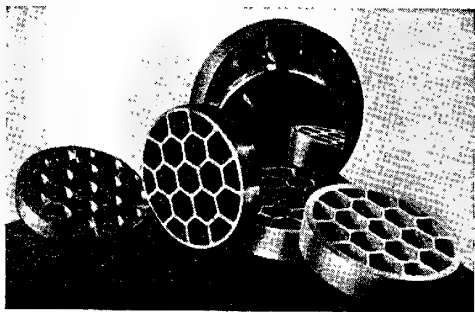


Рис. 8.

Самое большое зеркало имеет диаметр 210 мм, диаметр же остальных зеркал и заготовок близок к 140 мм. На рисунке слева мы видим зеркало из нержавеющей стали с цилиндрическими высверленными ячейками трех диаметров, надлежащим образом подобранных; остальные зеркала из различных сплавов алюминия и магния получили сотовую форму при отливке, кроме зеркала диаметром 210 мм, сотовые ячейки которого были высверлены, а затем отфрезерованы. В одном из зеркал мы видим яркое отражение предметов; это зеркало выполнено из 25-процентного алюминий-магниевого сплава с последующим алюминированием оптической поверхности.

Данное зеркало и зеркало из нержавеющей стали неоднократно испытывались в телескопе по звездам и сравнивались с такими же зеркалами (диаметр около 140 мм) из пирекса и зеркального стекла. Относительно стального зеркала приведу краткую выдержку из своего отчета:

«В феврале 1938 г. это зеркало было вынесено из теплого помещения на мороз и немедленно установлено в телескопе, после чего произведено наблюдение двойной звезды ( $\alpha$  Близнецов) при окуляре, дающем зрачок выхода 0,7 мм. В этот вечер изображения были очень хорошими, и можно было наблюдать совершенно четкую дифракционную картину двойной звезды.

\*) Максutow Д. Д. Отчеты по работам 1936 и 1937 гг.

Изображения этой и других звезд сохраняли подобие на зафокальных и предфокальных изображениях, что говорило об отсутствии сферической аберрации. ... Между моментами выноса зеркала из теплой комнаты и первого наблюдения прошло более 10, но менее 15 минут (время, необходимое на сборку и юстировку телескопа); разность температур была около 25°. При таких условиях стеклянное зеркало потребовало бы многих часов отстойки. ... Сотовая структура зеркала, если она не выступила при полировке изделия, не выступает на поверхности и при переменах температуры».

Приведу некоторые дополнительные сведения об этом зеркале и его печальной судьбе. Зеркало было вырезано из болванки нержавеющей стали, случайно оказавшейся на складе. Марка стали: ЭЖК2; состав по паспорту \*):

|    |       |            |                             |
|----|-------|------------|-----------------------------|
| Cr | ..... | 13—15%     | } Твердость по Бринеллю 197 |
| Ni | ..... | 0,6%       |                             |
| Si | ..... | 0,7%       |                             |
| Mg | ..... | 0,5%       |                             |
| C  | ..... | 0,13—0,23% |                             |

Зеркало было отполировано в начале 1937 г. Высокая твердость благоприятствовала полировке, и мы ее закончили меньше чем в 3 дни и придали поверхности зеркала точную параболическую форму. В течение 6 лет, до весны 1943 г., зеркало многократно исследовалось, не обнаруживая под контролем теневого метода сколько-нибудь заметных деформаций поверхности. Отсюда можно было заключить, что если в данной заготовке, может быть случайно, удалось освободиться от внутренних вредных напряжений металла и его последующих деформаций, то задачу заведомого устранения остаточных напряжений (в соответствии с оптическими допусками на деформации) можно поставить перед металлургами.

Весной 1943 г. в гор. Ионкар-Ола уборщица опрокинула это зеркало, и оно из установки упало на пол с метровой высоты; в результате поверхность стала астигматичной и приобрела местную деформацию на краю, позволяющую при теновом испытании безошибочно установить, каким местом ударилось зеркало об пол.

Итак, опыты с зеркалами сотовой конструкции из нержавеющей стали показали, что о таких зеркалах можно говорить, как о вполне созревших для внедрения в астрономическую практику; опыты со стальными хромированными зеркалами дали не менее обнадеживающие результаты. Недоработанным остается вопрос термической или иной обработки металлов, освобождающей их от напряжений и последующих деформаций с необходимой для оптических целей степенью совершенства. По-видимому, это новый и трудный для металлургов вопрос, а металл непрозрачен

\*) Сталь ЭЖК2 по новой номенклатуре имеет обозначение 2Х13 (ГОСТ 5632—71). (Прим. ред.)

и не позволяет, подобно стеклу, применить к себе оптические методы исследования внутренних напряжений.

Не разрешив строго этого вопроса, было бы некоторым легкомыслием строить крупный и дорогой рефлектор с металлическим зеркалом, которое через некоторое время может оказаться негодным из-за деформации своей первоначально точной поверхности \*).

По решению приходит тогда, когда появляется на них реальный спрос и когда условия задачи четко сформулированы. По-видимому, сейчас это время наступило, и металлурги должны решить ту же задачу, которую в свое время с успехом разрешили стекловары.

Не предугадывая, какой металл окажется наиболее практически выгодным, перечислим преимущества металлических зеркал перед стеклянными.

1. Величина  $\varphi$  у металлов в десятки раз выше, чем у стекла. Поэтому металлические зеркала, даже очень крупного размера, будут в малой степени страдать эффектом края. Если оптик сумеет придать таким зеркалам необходимую точную форму, то качество изображения в телескопе будет ограничено лишь атмосферными помехами, но не температурными.

2. Высокая температуропроводность  $q$  металлов заставляет ожидать, что фокусное расстояние телескопа будет хорошо следовать выражению (16) при изменениях температуры. Так как то же относится и к удлинениям трубы телескопа, представляющей некоторую металлическую конструкцию, то всегда можно сочетать материалы зеркал и трубы таким образом, чтобы при температурных изменениях происходила компенсация смещения фокуса изменением длины трубы. Это достижимо не только в простых системах рефлектора, но и в сложных системах рефлектора телеобъективного типа.

В результате мы освободим астронома от частых, весьма утомительных и не всегда достигающих цели перефокусировок во время длительных астрономических экспозиций.

3. Комбинируя металлы для трубы, для главного и для вторичного зеркал, мы получаем возможность в телеобъективных системах не только удерживать фокус на пластинке, но и изменять фокусное расстояние  $f$  системы, а вместе с ним и масштаб изображения по закону:

$$f_1 = f_1 [1 + \alpha_r (t_1 - t)], \quad (19)$$

где результирующий коэффициент  $\alpha$ , может принимать любые значения в широком интервале. В частности, он может быть обращен в нуль; но выгоднее рассчитать систему так, чтобы  $\alpha$  равнялся коэффициенту расширения стекла фотопластинки. В этом

\*) Если мы и встанем на этот путь, то постараемся дублировать металлические зеркала такими же из пирекса.



случае астроному не придется вводить температурные поправки при измерении негативов.

4. Изготавливая зеркало и оправу из металлов с одинаковым температурным расширением, мы получаем возможность свести до минимума зазоры между зеркалом и оправой и не бояться вредных смещений зеркала в оправе и разъюстировок телескопа. В случае же стеклянных зеркал, сочетаемых с наиболее рациональными стальными оправами, всегда приходится оставлять между стеклами и оправой значительный температурный зазор, так как у стекол (особенно у пирекса и тем более у кварца) коэффициент расширения меньше, чем у стали; сплавы же для оправ с пониженным коэффициентом  $\alpha$  и дороги и качественно уступают стали. Имеются, правда, сорта оптического стекла с коэффициентом расширения, очень близким к стали; в этом смысле такие сорта стекла представляют значительный интерес, особенно для астрометрических приборов.

5. Металлы, благодаря высокой теплопроводности и теплоупругости, а в конечном счете благодаря высокому значению  $\psi$ , требуют сравнительно короткое время для отжига.

Отлитый в форму расплавленный металл во много раз быстрее стекла приводится к комнатной температуре, не приобретая вредных напряжений.

По-видимому, отжиг крупного астрономического зеркала из металла может продлиться всего лишь несколько дней, тогда как для отжига крупного стеклянного зеркала нужны многие месяцы (в зависимости от размеров зеркала), по прошествии которых мы, может быть, принуждены будем узнать, что зеркало треснуло еще в самом начале отжига или что оно еще при отливке неудовлетворительно заполнило литейную форму.

Теперь понятно, насколько дешевле и быстрее должно быть изготовление металлической заготовки для зеркала по сравнению со стеклянной.

6. По той же причине разогретое во время полировки зеркало требует короткой отстойки, если оно металлическое, и весьма длительной, если оно стеклянное. Пока зеркало не приняло во всей своей толще однообразной температуры, равной температуре помещения мастерской, до тех пор точные исследования формы и кривизны его поверхности совершенно бессмысленны. В случае крупных зеркал из стекла оптик, поработав на полировальной машине в течение 15—20 мин., затем оказывается «безработным» и идет в течение долгого времени отстойки зеркала (для крупных зеркал это многие часы), чтобы получить возможность уверенно наблюдать и оценить результаты своей кратковременной работы по ретуши зеркала. Наш опыт с металлическими зеркалами диаметром до 210 мм показал, что они практически не требуют никакой отстойки для исследования их формы поверхности и нуждаются в самой кратковременной отстойке (несколько минут) для измерения их кривизны, которая весьма быстро, «на глазах», изменяется в соответствии с формулой (16).

7. Металлическому зеркалу легко и быстро придется требуемая грубая форма путем его проточки на металлорежущих станках, в то время как придание формы стеклянному зеркалу осуществляется путем шлифовки, требует больших затрат времени и абразивных материалов и представляет собой наиболее грязную и неприятную операцию. Для получения сотовой конструкции зеркала, если она не была осуществлена при отливке в форму, металлическое зеркало удастся просто обрабатывать, выверливая, а затем фрезеруя сотовые ячейки, что практически невыполнимо для стеклянного зеркала. На стороне стекла остается, впрочем, преимущество более быстрой и легкой полпровки; но длительность времени отстойки при полировке сводит на-нет это преимущество.

8. При использовании сотовой конструкции в металлических зеркалах будет меньше толщина стенок сот, а вместе с тем будет достигнуто большее относительное облегчение зеркала по сравнению с зеркалом стеклянным. Это происходит потому, что в металлическом зеркале мы не боимся довести толщину стенок сот до расчетной величины, а в хрупком стеклянном зеркале мы сознательно преувеличиваем толщину стенок, чтобы во время транспортировки и грубой обработки зеркала не выщербить и не расколоть сотовой формы.

Так, эквивалентный удельный вес стального сотового зеркала можно довести до 1,8—2,1, т. е. облегчить его применением сотовой конструкции приблизительно в 4 раза, сделав его легче сплошного стеклянного зеркала; для алюминиево-магниевого сотового зеркала можно добиться приблизительно 3-кратного облегчения и эквивалентного удельного веса 0,8—0,9: такое зеркало, повернутое сотами вверх, плавает на воде; в то же время оно дает вполне хорошие изображения звезд и телескопа. В стеклянных сотовых зеркалах нам удавалось получить облегчение веса не более 2-кратного; если же говорить о 5-метровом пирексовом зеркале (Маунт Паломар), то его ребристая жесткая конструкция облегчила вес приблизительно на 40%.

В настоящей главе мы не рассмотрели очень важного вопроса о собственной жесткости материалов для зеркал, т. е. о способности их противостоять деформирующим усилиям от собственного веса. Этот вопрос будет рассмотрен в дальнейшем, после чего можно будет еще более строго подойти к выбору наиболее выгодного материала для зеркала.

Сейчас резюмируем кратко ассортимент материалов для зеркал, которым располагает современный оптик.

1. Стекло. Если делать зеркало из стекла, то уж во всяком случае не из флинта: тяжелый флинт по сравнению с кропом обладает вдвое меньшим  $\psi$  и в полтора раза большим удельным весом; кроме того, он труднее полируется, так как обладает меньшей твердостью и меньшей химической стойкостью, что благоприятствует появлению «палетов». Так как техническое, так называемое «зеркальное», стекло по своим физико-химическим и ме-

халлическим свойствам относится к типу кропов, то было бы излишней роскошью применять для зеркал дорогие оптические кроны там, где им равноценно зеркальное стекло; важно только, чтобы оно было в должной мере освобождено от внутренних напряжений, т. е. тонко отожжено.

Стекло пирекс, как мы видели, несколько выгоднее зеркального стекла, но и оно имеет свои недостатки. Во-первых, это очень тугоплавкое стекло с большим содержанием кремнезема, а потому во время варки почти не поддается размешиванию и получается в виде свилстой массы с огромным количеством внутренних пузырей; эти пузыри, вскрываясь на поверхности, засоряются абразивным материалом и являются источником царапин и местных вмятин на поверхности, борьба с которыми несколько осложняет обработку зеркал. Во-вторых, малый коэффициент расширения пирекса (его положительное свойство) часто является помехой для конструктора в связи с необходимостью применять значительные температурные зазоры между зеркалом и оправой.

2. Плавленный кварц. Кварц принадлежит к числу материалов, выгодных для зеркал. По коэффициенту  $\psi$  он в  $\sim 30$  раз лучше кроны, в  $\sim 10$  раз лучше пирекса, конкурирует с нержавеющей сталью, но вдвое уступает углеродистой стали и в пять раз уступает меди и серебру. Малый удельный вес ( $d = 2,2$ ) при достаточной упругости ( $E = 6200$ ) позволяет осуществлять сравнительно легкие зеркала, подобные пирексовым. Кварц несколько медленнее шлифуется и полируется по сравнению со стеклом, зато он обладает большей химической стойкостью и меньшей склонностью приобретать царапины во время обработки. Благоприятной также является отстойка кварцевых зеркал.

И все же кварцевые зеркала не получили достаточно широкого распространения по следующим причинам.

Прежде всего, технологический процесс получения плавленного кварца очень сложен и капризен, а потому получаемый продукт оказывается весьма дорогим. Далее, малый коэффициент расширения кварца требует значительных температурных зазоров при сочетании зеркала с металлической оправой; безукоризненным веществом для оправы кварцевого зеркала является инвар, но он также очень дорог и обладает более низкими механическими свойствами по сравнению со сталью. Наконец, современная техника отказывается преодолеть трудности изготовления кварцевых зеркал достаточно большого размера. Известно, что первоначально 5-метровое зеркало обсерватории Маунт Паломар предполагалось делать из кварца, но дальнейшие исследования показали, что осуществимый предел для диаметра кварцевых зеркал, по видимому, близок к 1,5 м; в результате было решено отливать 5-метровое зеркало из пирекса \*).

---

\*) В настоящее время указываемые Д. Д. Максуповым трудности преодолены и имеются первоклассные телескопы с зеркалами из плавленного кварца диаметром до 4 м. (Прим. ред.)

3. Металлы и сплавы. К настоящему времени можно установить, что зеркала из хромированной стали и, особенно, из нержавеющей стали стоят на пороге ближайшего внедрения в астрономическую практику; первые из них имеют преимущество более высокого  $\psi$ , вторые — преимущество простоты технологического процесса изготовления.

Все мягкие металлы и сплавы непригодны для непосредственного изготовления из них зеркал, так как не принимают чистой бесштриховой полировки; большинство твердых леоднофазных сплавов также непригодно для полировки, так как зерна различных фаз обладают различными физико-химическими и механическими свойствами, а потому отполированная поверхность оказывается рябой, т. е. испещренной множеством мельчайших точек и ячеек выкропившейся фазы.

По мы упоминали, что предварительно подготовленную поверхность такого зеркала можно покрыть тонкой хромовой пленкой и дальше оптически обрабатывать эту пленку; в результате зеркало будет обладать коэффициентом  $\psi$ , соответствующим ополе зеркала, а оптическая поверхность — свойствами хромового зеркала. В этом случае и медь, и бронза, и алюминий, и его сплавы смогут найти себе полезное и выгодное применение в астрономических зеркалах.

Не приходится повторять, что во всех случаях металлическим зеркалам выгоднее придавать жесткую ребристую форму, например, сотовую, и, кроме того, что для повышения коэффициента отражения металлическое зеркало следует алюминировать, например, путем испарения алюминия в вакууме; алюминиевая зеркальная пленка отражает около 90% света, она весьма долговечна, а в случае повторных алюминирований может быть смыта слабым раствором щелочи без вреда для зеркала из нержавеющей стали или любого другого зеркала с хромовым покрытием.

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ ОПТИКИ

Зеркальная оптика обычно серебрится или алюминировается с лицевой поверхности, а потому совершенно безразличны оптические свойства материала для зеркала; но так как в зеркальных инструментах качество изображения в высшей степени страдает от температурных деформаций зеркал и деформаций от их собственного веса, то материалы для зеркал интересуют нас, прежде всего и главным образом, с точки зрения их физико-механических свойств.

Материалы для преломляющей оптики (линзовой, призмной) должны в первую очередь удовлетворять целому ряду чисто оптических требований, а затем уже требованиям механического характера, и притом в значительно более скромной степени.

Прежде всего такой материал должен быть светопрозрачным, по крайней мере для той области спектра, в которой предполагается производить наблюдения. Так как абсолютно светопрозрачных материалов не существует, то можно говорить о большем или меньшем светопропускании данного материала для данной длины волны  $\lambda$ . При разных толщинах одного и того же прозрачного вещества его светопропускание будет различным; так, скверное по пропусканию стекло электрической лампочки пропускает много света только потому, что оно тонкое; или, хорошее по пропусканию оптическое стекло в форме огромного блока весом в несколько сот килограммов поглощает заметное количество света только потому, что поглощение происходит на длинном пути. Поэтому, коэффициент пропускания  $p$  следует отнести к какой-нибудь определенной толщине вещества, и такой толщиной принято считать 1 см. Так, если коэффициент пропускания  $p$  некоторого стекла для некоторой длины волны  $\lambda$  равен, например,

$$p_{\lambda} = 0,985 = 98,5\%,$$

то каждый сантиметр такого стекла в направлении распространения лучей пропустит 0,985 количества света длины волны  $\lambda$ , и если длина пути лучей в этом стекле равна  $d$  см, то полное пропускание будет

$$P_{\lambda} = p_{\lambda}^d. \quad (20)$$

Например, при  $p_{\lambda} = 0,985$  и при  $d = 10$  см  $P_{\lambda} = 0,86 = 86\%$ .

Если  $p_{\lambda}$  — коэффициент пропускания, то  $k_{\lambda} = (1 - p_{\lambda})$  является коэффициентом поглощения, показывающим, какая доля

лучистой энергии поглощается при прохождении 1 сантиметра вещества. В нашем случае  $k_\lambda = 0,015 = 1,5\%$ , а общее поглощение в 10 сантиметрах стекла

$$K_\lambda = (1 - P_\lambda) = 0,14 = 14\%.$$

Само собой понятно, что рассмотренное выше светопропускание или светопоглощение не учитывает потерь света при отражении на поверхностях раздела стекло — воздух в линзах или призмах. Эти светопотери зависят от показателя преломления  $n_\lambda$  вещества и вычисляются в случае падения лучей, близкого к нормальному, по известной формуле Френеля:

$$\bar{p}_\lambda = \frac{4n_\lambda}{(n_\lambda + 1)^2} \quad \text{или} \quad \bar{k}_\lambda = \frac{(n_\lambda - 1)^2}{(n_\lambda + 1)^2}. \quad (21)$$

Так, для линзы из обычного крона дополнительно теряется около 4,2% света при отражении от каждой поверхности раздела стекло — воздух; для обычных флинт-ов эти потери возрастают до ~5,5%, а для тяжелых флинтов они выше 6%. При наклонном падении лучей потери увеличиваются и стремятся к 100% при скользющем падении лучей на преломляющую поверхность.

Потери на отражение следует прибавить к потерям на поглощение. Как это делается, — проще всего усвоить на следующем примере (рис. 9). Пусть лучи проходят через крон с толщиной  $d_1 = 10$  см и флинт с толщиной  $d_2 = 5$  см нормально к преломляющим поверхностям; пусть для крона  $p' = 0,99$  и  $\bar{p}' = 0,958$ , а для флинта  $p'' = 0,98$  и  $\bar{p}'' = 0,945$ . Так как у каждого стекла две поверхности раздела с воздухом, то общее пропускание системы равно:

$$P = \bar{p}' \cdot (p')^{d_1} \cdot \bar{p}' \cdot \bar{p}'' \cdot (p'')^{d_2} \cdot \bar{p}'' = (\bar{p}')^2 (\bar{p}'')^2 (p')^{d_1} (p'')^{d_2} = 0,67 = 67\%,$$

откуда и общие светопотери:

$$K = (1 - P) = 0,33 = 33\%.$$

В крупных астрономических инструментах не так страшны потери света на отражение, зависящие от числа линз, но не от их размеров, как потери на светопоглощение в толще стекла, в данном случае значительной. Поэтому для астрономических объективов и, особенно, для крупных спектральных призм следует выбирать стекло с возможно меньшим светопоглощением в интересной для наблюдений области спектра.

Понятно, что светопоглощение вещества может изменяться с изменением длины волны. Если в пределах видимого спектра светопоглощение, хотя бы и значительное, не изменяется или почти не изменяется с длиной волны, то такое вещество представ-

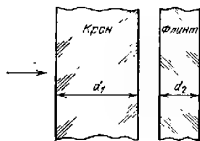


Рис. 9.

ляется нашему глазу бесцветным в случае малого светопоглощения и серым — в случае значительного светопоглощения. Это, впрочем, еще не значит, что стекло, нейтрально-серое для видимой области спектра, останется таким же и для других областей спектра. Но если в пределах видимой области спектра светопоглощение заметно меняется с изменением длины волны, — стекло или другое прозрачное вещество представляется нам окрашенным. «Окрашенность» есть результат не постоянного светопропускания в пределах видимого спектра, но этот термин можно распространить, филологически неудачно, и на невидимые области спектра.

Так как астрономические наблюдения в большинстве случаев используют фотографический метод, фотографическая же пластинка чувствительна не только к синим и фиолетовым, но и к ультрафиолетовым, а иногда и инфракрасным лучам, — то для оценки оптических веществ и материалов необходимо знать их светопропускание по спектру более широкому, чем видимая часть спектра.

С ультрафиолетовой стороны можно ограничить спектр длинной волны  $\lambda = 0,290$  мкм, так как более коротких волн не пропускает земная атмосфера; с инфракрасной стороны можно идти значительно дальше за границу видимого спектра, и знание точных констант стекол для длин волн  $\sim 1,5$  мкм уже сейчас насущно необходимо, и часто приходится сожалеть, когда такого материала нет.

Посмотрим, как ведут себя некоторые французские \*) стекла, для чего на рис. 10 изобразим коэффициенты  $p_\lambda$  светопропускания крона и флинта для спектрального интервала от  $\lambda = 0,700$  мкм до  $\lambda = 0,290$  мкм. Как видим, кривые пропускания имеют резко выраженную границу в ультрафиолетовой области спектра; для крона она соответствует  $\lambda_0 \approx 0,31$  мкм, а для флинта  $\lambda_0 \approx 0,34$  мкм.

Чем чище материалы, из которых сварено стекло, и, в особенности, чем лучше они освобождены от примесей железа, тем дальше отодвигается граница пропускания в сторону коротких волн. Но даже при наиболее чистых материалах, сваренных в специальных горшках или даже платиновых тиглях, границу пропускания стекла не удастся сместить заметно дальше  $\lambda_0 = 0,29$  мкм. Стекло с несколько отодвинутой границей светопропускания носит название «увюлевого» стекла (U. V.) и отличается от обычного оптического не своим химическим составом, а только лишь способом приготовления и чистотой исходных материалов.

Мы знаем, что основой стекла является кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ). Кремнезем может входить в шихту в виде песка с различными примесями, в числе которых железо оказывается одной из наиболее вредных примесей. Но можно этот песок очистить путем

\*) *Danjon A., Couder A. Lunettes et télescopes, 1935, p. 565.*

его промывки, химической обработки, дробления и магнитной сепарации; содержание в песке железа может быть таким образом снижено с десятых до сотых и даже тысячных долей процента. Такие операции оправдают себя только в том случае, если исходный материал (песок) достаточно чист, т. е. содержит малые примеси железа. Поэтому для производства оптического стекла требуются совершенно исключительные по чистоте пески при надлежаще организованных их разработке, транспортировке и хранении.

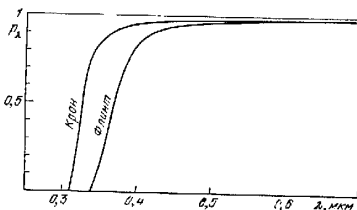


Рис. 10.

Для приготовления увиолевого стекла предпочитают все же пользоваться не песком, а кристаллическим кварцем, который сам по себе чище песка, легче может быть освобожден от случайного засорения, а после соответственной очистки дает наиболее чистую составную часть шихты  $\text{SiO}_2$ . Понятно, что и остальные составляющие шихты стекла должны быть столь же чистыми.

По стеклу в течение продолжительного времени и при очень высоких температурах варится в шамотных\*) горшках. В этих условиях вещество горшка частично растворяется и переходит в массу стекла. Поэтому глина, входящая в состав шамота, должна удовлетворять самым строгим специальным требованиям. Легко понять, что чем дольше варится стекло, чем выше температура варки и чем сильнее взаимодействует данный шамот со стеклом данного состава, тем больше перейдет шамота из горшка в стекло и тем будет больше снижение качества стекла. Поэтому не всякий сорт стекла и не во всяком стекловаренном горшке можно приготовить увиолевое, если бы даже материалы для шихты были взяты химически чистыми.

Мы имели довоенный опыт изготовления на заводе по крайней мере трех сортов увиолевого стекла (крон К-8, флинт Ф-1 и тяжелый флинт ТФ-1), которые несколько не уступали заграничным увиолевым стеклам, а скорее их превосходили.

\*) Шамотом называется обожженная огнеупорная глина, используемая для изготовления горшков, в которых варится стекло. (Прим. ред.)



Воспользуемся кривыми рис. 10 и вычислим, какой процент лучей для различных  $\lambda$  пропустит большой спектральный прибор (типа небулирного спектрографа) вдоль оснований призм, если сумма их оснований равна 50 см и если призмы изготовлены из флинта (рис. 10). Снимем с кривой рис. 10 значения  $P_\lambda$  для нескольких  $\lambda$ , а затем по знакомой уже нам методике вычислим  $P_\lambda$ .

Таблица 3

| $\lambda$ , мкм | 0,39   | 0,40  | 0,42 | 0,44 | 0,60 |
|-----------------|--------|-------|------|------|------|
| $P_\lambda$     | 0,003% | 0,52% | 2,7% | 5,6% | 45%  |

В действительности светопропускание еще меньше, так как мы не учитывали потерь на отражение лучей. Такой спектрограф был бы хорош для изучения длинноволновой части спектра и почти бесполезен для синей и фиолетовой частей спектра; ультрафиолетовую же часть он бы «съедал» практически полностью. Поэтому, чтобы спектрограф мог «заглянуть», хотя бы и очень скверно, в ближайшую ультрафиолетовую часть спектра, необходимо делать его призмы из исключительно высококачественного увиолевого флинта; и здесь лучше не гнаться за большой дисперсией, так как такое требование равносильно либо переходу от обычных флинтов к тяжелым, которые не могут быть сварены в виде полноценных увиловых, либо увеличению суммы длин оснований призм и катастрофическому уменьшению светопропускания для коротких волн: мы помним, что светопропускание есть показательная функция от толщины стекла, а такие функции быстро стремятся к нулю с ростом показателя, если основание функции существенно меньше единицы.

Никаких более строгих сведений о светопропускании стекол давать не стоит, так как светопропускание резко изменяется от одной плавки к другой в зависимости от чистоты материалов, отношения к работе и условий работы на заводе.

Можно только сказать, что в среднем флинты бывают столь же, если не более, прозрачны, чем кроны, в средней видимой части спектра и заметно уступают им в прозрачности в фиолетовой и ультрафиолетовой области спектра. Или: чем выше дисперсия стекла, тем, как правило, стекло труднее и хуже осуществляется в виде увиолевого.

В тех случаях, когда астроному нужно пропикать в ультрафиолетовую область спектра возможно ближе к границе, поставленной земной атмосферой, увиоленное стекло пока не дает хорошего решения, и приходится использовать другие более прозрачные для коротких волн вещества: кварц, фтористый литий, селенин\*) и другие. Эти вещества либо дороги, либо трудны для

\*) Хлористый калий. (Прим. ред.)

точной обработки, либо химически пестойки, либо обладают малой дисперсией. Короче говоря, задача крупных и мощных по дисперсии призматических астрономических спектрографов пока не находит хорошего практического решения.

Следующим нашим требованием к материалу для преломляющей оптики является требование к его оптической однородности. Оптической однородностью среды мы называем постоянство ее показателя преломления во всех точках. Пас здесь не интересует абсолютное значение показателя преломления  $n$ , изменяющегося в зависимости и от сорта стекла, и от длины волны лучей, и от температуры; нам важно только, чтобы при данной установившейся постоянной температуре и для данной длины волны  $\lambda$  показатель  $n$  был постоянен для каждого элементарного объема стекла.

Такое условие может быть выполнено только с известной степенью приближения к идеалу, а потому следует установить некоторые обоснованные допуски на оптическую неоднородность. Обратимся к рис. 11, на котором изображен стеклянный кубик  $ABCD$  со слоистым расположением неоднородностей; для простоты допустим, что в кубике с показателем преломления  $n$  имеется только один слой неоднородности с показателем на  $\Delta n$  большим, чем у остальной массы стекла и что этот слой параллелен ребру  $AB$ . Если плоская волна  $I-I$  падает на грань  $AB$ , то она проходит через совокупность сложенных вместе трех плоскопараллельных пластинок с показателями  $n$ ,  $n + \Delta n$  и  $n$ , а потому выходящий из стекла фронт волны  $II-II$  окажется недеформированным. Фронт  $I-I$  может падать на грань  $AB$  не нормально, а наклонно, при этом фронт  $II-II$  повернется на тот же угол, что и фронт  $I-I$ , и по-прежнему останется недеформированным.

Совсем иная картина будет наблюдаться для волны  $III-III$ , падающей на ребро  $AD$  и проходящей в стекле вдоль его слоев неоднородности. Вышедшая из стекла волна  $IV-IV$  приобретает местную деформацию  $h$ , углубленную при  $\Delta n > 0$  и наоборот; при этом, если  $l$  — толщина стекла в направлении неоднородности, то

$$h = -\Delta n \cdot l. \quad (22)$$

Для первоклассной визуальной оптики должно быть выполнено условие Рэлея:  $h \leq \frac{1}{4} \lambda$ , а потому из выражения (22) определяем предельно допустимую неоднородность  $\Delta n_{\max}$  в зависимости от ее толщины  $l$ :

$$\pm \Delta n_{\max} = \frac{\lambda}{4l}. \quad (23)$$

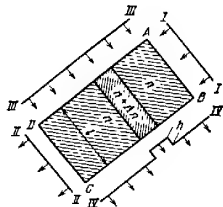


Рис. 11.

Составляем на основании (23) табл. 4 в предположении, что на протяжении всей толщины  $l$  неоднородность  $\Delta n_{\max}$  постоянна и что  $\lambda = 0,555$  мкм.

Табл. 4 можно иллюстрировать следующими примерами.

1. Покрытое стекло в микроскопии имеет толщину порядка 0,1 мм, — поэтому для него можно допустить неоднородность показателя преломления в третьем знаке (после запятой).

Таблица 4

| $l$ , мм              | 0,01                | 0,1                 | 1                   | 10                  | 100                 | 1000                |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $\pm \Delta n_{\max}$ | $1,4 \cdot 10^{-2}$ | $1,4 \cdot 10^{-3}$ | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$ | $1,4 \cdot 10^{-6}$ | $1,4 \cdot 10^{-7}$ |

2. В небольших астрономических объективах, толщина линз которых близка к 10 мм, можно допускать неоднородность в пятом знаке показателя преломления.

3. В крупных объективах и, особенно, в крупных спектральных приборах, в которых длина пути луча в стекле может достигать нескольких сотен миллиметров, — существенны неоднородности не только в шестом, но часто и в седьмом знаке показателя преломления.

Случай неоднородности, изображенный на рис. 11, схематизирован для простоты рассуждения, но он очень близок к реальному случаю неоднородностей в стекле, располагающихся правильными, почти параллельными слоями, пронизывающими всю толщину изделия. Из такого «слоистого пирога» можно выкромить линзу, различно ориентируя ее относительно направления слоев неоднородности; при этом в одном случае ориентировки линза окажется хорошей, а в другом случае ориентировки линза окажется никуда негодной.

Отсюда мы делаем заключение, что при «слоистом» стекле изделие следует ориентировать так, чтобы лучи света пропизывали стекло по возможности перпендикулярно к слоям, а не вдоль слоев.

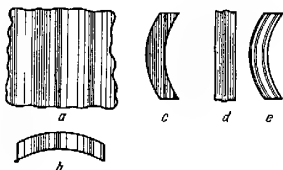


Рис. 12.

Например, из слоистого стекла, изображенного на рис. 12, а, мы хотим выкромить мениск для менскового телескопа. Самым неправильным было бы решение, изображенное на рис. 12, б; значительно лучшие результаты дает мениск 12, с; но самым правильным было бы выкромить из стекла а диск 12, d, а затем молдировать его в форму мениска 12, е; в этом случае, даже при значительных неоднородностях стекла, мениск не снизит заметным образом качества изображения в менсковом телескопе.

Рассмотренные сейчас неоднородности назовем неоднородностями первого рода. Они большей частью обусловлены различием химического состава стекла и реже физической причиной — несовершенством отжига стекла. Поясним сказанное. Стекло варится в шамотном горшке; при высоких температурах парки шамот горшка реагирует с жидкой вязкой массой стекла и медленно, но неизбежно, растворяется в стекле; получающееся вещество представляет собою тоже стекло, но другого химического состава и вместе с тем другого показателя преломления. Во время варки масса стекла размешивается «мешалкой» с целью выровнять химический состав в массе стекла и тем самым устранить «химические» неоднородности показателя преломления. По успешному перемешиванию стекла противодействуют значительная вязкость жидкой стекломассы и трение между приведенной в движение жидкостью и неподвижными стенками горшка; в результате, движущийся ком вязкого стекла приобретает слоистое строение преимущественно на своей периферии. Кроме пагубного действия на однородность стекла со стороны стенок горшка, мы имеем такое же действие со стороны воздуха, соприкасающегося с верхней поверхностью стекла: здесь крайне легко происходит улетучивание более летучих составляющих стекла, а потому химический состав верхнего слоя стекла в горшке существенно отличается от состава внутренней массы; перемешивание стекла заставляет и этот слой принять участие в общем крутоверчении стекломассы, но, не справляясь с задачей до конца, дает стекло сравнительно однородное лишь в средних зонах горшка и слоистое вблизи периферии. Так как «мешалка» обычно делается также из шамота, то она, как и стенки горшка, постепенно растворяется в стекле и способствует появлению местной неоднородности в центральной части объема стекла в виде так называемого «смерча». Таким образом, горшок сваренного стекла при данном способе размешивания представляет собой сравнительно однородное «ядро», пронизанное неоднородным, сравнительно тонким, но длинным смерчем и окруженное довольно толстой неоднородной оболочкой слоистого строения.

В некотором объеме стекло может быть вполне однородно по своему химическому составу, но если такое стекло слишком быстро остудить или вообще неравномерно «отжечь», то в нем возникнут напряжения (слоистого или местного характера), а вместе с ними и изменение показателя преломления, т. е. оптическая неоднородность.

Поэтому можно представить себе как слоистую, так и местную оптическую неоднородность, и не только химического, но и физического происхождения.

Кроме неоднородностей первого рода, характерных своей значительной протяженностью, и сравнительной плавностью, в стекле могут быть мелкие, резко очерченные местные неоднородности питевидного характера. Оторвавшийся и растворяющийся в стекле кусочек шамота, или крупинки недостаточно размельченной и пе-

ремешанной неоднородной шихты, или порции стекла с поверхности, соприкасающейся с воздухом, — захватываются мешалкой внутрь жидкой стекломассы, не успевают вполне раствориться и размешаться в стекле и растягиваются в длинные нитевидные прозрачные включения второго рода, называемые свиллями.

Диаметр свилей обычно очень мал и измеряется десятками долями миллиметра и редко целыми миллиметрами; длина же свилей может измеряться сотнями миллиметров.

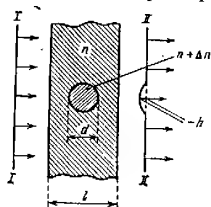


Рис. 13.

Если  $d$  — диаметр свили и  $\Delta n$  — разность между ее показателем преломления и показателем преломления остальной массы стекла, то такая свиль вызовет деформацию  $h$  на волновой поверхности  $II-II$  (рис. 13); причем, подобно выражению (22):

$$h = -\Delta n \cdot d, \quad (24)$$

но независимо в этом случае от толщины остальной массы стекла  $l$ .

Величина  $\Delta n$  может принимать различные значения, но не выше некоторого предела, близкого к 0,2, так как показатели преломления различных стекол редко разнятся более чем на 0,2. Если бы даже в тяжелом флинте ( $n = 1,66$ ) растворилась частица кварца ( $n = 1,46$ ), то и в этом случае  $\Delta n$  было бы не более 0,2. Предположим худший случай —  $\Delta n = 0,2$ , и посмотрим, при каком диаметре  $d$  свиль окажется безвредной, т. е. не внесет волновой aberrации  $h$  более  $\frac{1}{4} \lambda$  (при  $\lambda = 0,555$  мкм). Из выражения (24) паходим:

$$d_{\max} = 0,7 \text{ мкм.} \quad (25)$$

Но такую свиль ни глазом, ни через лупу средней силы увидеть нельзя, и только, может быть, при особых условиях эксперимента можно обнаружить ее присутствие по дифракционному свечению. Так как обычные свили значительно крупнее, то все они, при достаточно больших значениях  $\Delta n$ , оказываются принципиально вредными. В силу самого характера происхождения свили редко бывает, что в ней  $\Delta n$  столь же мало, что и в неоднородностях первого рода; выражение (24) дает для безвредной свили с диаметром, например,  $d = 1$  мм

$$\Delta n_{\max} = \pm 0,00014,$$

а столь малая величина  $\Delta n$  почти невероятна для свили. Можно привести еще и такое пояснение: если мы обнаружили свиль, то это значит, что она привела к существенной деформации волнового фронта, поэтому всякая обнаруженная свиль принципиально вредна.

По если глубже рассмотреть вопрос о вредности свили, то в большинстве случаев может оказаться, что даже при значительных волновых деформациях, вносимых свиллю, изображением в оптической системе с таким свилистым стеклом остается хорошим. Все дело в том, какую площадь светового отверстия занимает свиль с данным  $\Delta n$  и, отчасти, как она расположена в стекле. Для пояснения сказанного рассмотрим действие свили с точки зрения геометрической оптики, отвлекаясь от явления дифракции лучей на свили. На рис. 14 изображена линза объектива диаметра  $D$  и в ней прямолинейная свиль диаметра  $d$  и длины  $l$ ;  $\Delta n$  есть разность показателей преломления стекла и свили. С точки зрения геометрической оптики эту свиль можно рассматривать как цилиндрическую линзу — положительную при  $\Delta n > 0$  и отрицательную при  $\Delta n < 0$ . Такая цилиндрическая линза (свилль) имеет свой фокус, отличный от фокуса линзы объектива, а потому она вносит угловую аберрацию ( $\eta$ ) в плоскости, перпендикулярной направлению свили. В первом приближении (пренебрегая сферической аберрацией цилиндра и считая  $\Delta n \ll n$ ) фокусное расстояние такой цилиндрической линзы равно:

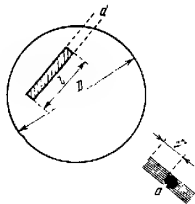


Рис. 14.

$$f \approx \frac{d}{8\Delta n}, \quad (26)$$

поэтому возле изображения точки  $a$  (рис. 14) появится «хвост», угловая величина которого, симметрично в обе стороны от точки  $a$ , окажется равной:

$$\pm \eta = \frac{d}{2f} = 4\Delta n. \quad (27)$$

Если теперь к чисто геометрическим представлениям отчасти присоединить представления дифракционные, то ширина хвоста будет зависеть от длины  $l$  свили; так, например, при  $l \approx D$ , т. е. когда свиль проходит через всю линзу по хорде, близкой к диаметру, угловая ширина хвоста ( $\beta$ ) будет близка к угловым размерам дифракционного кружка:

$$\beta \approx 2\alpha = \frac{2,44\lambda}{D}, \quad (28)$$

где  $\lambda$  — длина световой волны, принимаемая нами равной 0,555 мкм, и  $D$  — диаметр объектива. При более короткой свили хвост окажется соответственно шире в отношении  $D:l$ .

Свилль диаметра  $d$  и длины  $l$  «выводит из строя» и разбрасывает в хвост некоторую долю световой энергии, воспринимаемой объективом; эта доля ( $q$ ) равна отношению площади проекции

связи к площади отверстия объектива:

$$q = \frac{4dl}{\pi D^2}. \quad (29)$$

Остальная энергия  $(1 - q)$  образует дифракционное изображение звезды, причем в дифракционном кружке сосредоточено не более 84% этой энергии.

Если для упрощения задачи перейти от истинных яркостей к средним яркостям, т. е. принять, что яркости дифракционного кружка и хвоста постоянны, каждая на всем своем протяжении, то средняя яркость дифракционного кружка  $E_1$  в некотором условном выражении будет равна:

$$E_1 = \frac{0,84(1 - q)}{\pi \alpha^2}, \quad (30)$$

а средняя яркость хвоста  $E_2$  в том же условном выражении и в согласии с (27) и (28) будет равна:

$$E_2 = \frac{q}{2\eta \beta \left(\frac{D}{l}\right)} = \frac{q l}{16 \alpha \cdot \Delta n \cdot D}. \quad (31)$$

Так как  $q$ , как правило, значительно меньше единицы, то заменяем  $(1 - q)$  в выражении (30) единицей и, подставляя вместо  $q$  и  $\alpha$  их значения из выражений (29) и (28), находим отношение средних яркостей:

$$\frac{E_2}{E_1} = 0,36 \cdot \frac{\lambda d}{D^2 \Delta n} \left(\frac{l}{D}\right)^2, \quad (32)$$

или при  $\lambda = 0,555$  мкм

$$\frac{E_2}{E_1} = 0,0002 \frac{d}{D^2 \Delta n} \left(\frac{l}{D}\right)^2, \quad (33)$$

где  $d$ ,  $l$  и  $D$  выражены в миллиметрах.

В действительности, конечно, ни дифракционный кружок, ни хвост не имеют постоянных яркостей; так, в силу дифракции, хвост приобретает местные сгустки и дефекты света и вообще более сложное распределение яркости вдоль своей длины; кроме того, сферическая аберрация цилиндрической линзы (свилли) приводит к хвосту более длинному, чем это следует из выражения (27), и с постепенно убывающей яркостью по мере удаления от изображения звезды ( $a$ ).

Хотя наши выводы и не претендуют на полную строгость описания явления, они все же в первом приближении достаточно хорошо его описывают: относительная яркость хвоста, обусловленного свиллю, проходящей вдоль диаметра объектива ( $l = D$ ), пропорциональна ширине свилли ( $d$ ), обратно пропорциональна величине  $\Delta n$ , которую можно назвать «грубостью свилли», и обратно пропорциональна площади отверстия объектива ( $D^2$ ); множитель  $\left(\frac{l}{D}\right)^2$  учитывает относительную длину свилли.

Чем уже свиль, чем она «грубее» и чем она короче при заданном отверстии объектива, тем безвреднее такая свиль, так как относительная яркость создаваемого ею хвоста становится меньшей и в меньшей степени мешает наблюдению дифракционного изображения звезды.

Если яркость хвоста меньше яркости 4-го или 5-го дифракционного кольца, то, по-видимому, такой бледный хвост совершенно не мешает нам наблюдать дифракционные изображения звезд или мелких контрастных деталей. Но в этом случае относительная яркость хвоста должна быть близкой к  $\frac{1}{2000}$ ; соответствующую свиль мы назовем безвредной в отношении яркости хвоста, после чего выражение (33) приведет нас к следующей зависимости (при  $l = D$  и  $\lambda = 0,555$  мкм):

$$\Delta n \approx 0,4 \frac{d}{D^2}. \quad (34)$$

С другой стороны выражение (24) позволяет дать условие для свили, безвредной в отношении деформации волнового фронта, в следующем виде (для  $\lambda = 0,555$  мкм и независимо от длины свили):

$$\Delta n = \frac{0,00014}{d}, \quad (35)$$

где  $d$  также выражено в миллиметрах.

Сопоставляя (34) и (35), приходим к выводу условий для свили безвредной во всех отношениях:

$$\Delta n \geq \frac{0,0075}{D}, \quad (36)$$

$$d \leq 0,019D. \quad (37)$$

Возьмем, например, объектив диаметром 100 мм и соответственно вычислим по выражениям (36) и (37):

$$\Delta n \geq 0,000075$$

$$d \leq 1,9 \text{ мм.}$$

Допустим, что в свили  $\Delta n > 0,000075$ , например,  $\Delta n = 0,0001$ , но что  $d \leq 1,9$  мм; тогда для  $d = 1,9$  мм (при  $D = 100$  мм) найдем из выражений (24) и (33):

$$h = 0,00019 \text{ мм, т. е. больше } \frac{1}{4} \lambda$$

и

$$\frac{E_2}{E_1} = 0,00038, \text{ т. е. меньше } \frac{1}{2000}.$$

Иными словами, свиль, вредная по волновым деформациям, оказалась безвредной по относительной яркости «хвоста».

Примем по-прежнему  $D = 100$  мм и составим табл. 5 для  $h$  (24) и  $E_2 : E_1$  (33) для различных значений  $\Delta n$  и  $d$ .

Так как по первому признаку свиль считается безвредной, когда  $h \leq 1,4 \cdot 10^{-1}$  мкм, а по второму, когда  $E_2 : E_1 \leq 5 \cdot 10^{-4}$ , то



$$[D = 100 \text{ мм}; \lambda = 0,555 \text{ мкм}; l = D]$$

| $d$    | $\Delta n$        | $10^{-6}$         | $10^{-5}$         | $10^{-4}$         | $10^{-3}$         | $10^{-2}$         | $10^{-1}$         |
|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0,1 мм | $h, \text{ мкм}$  | $10^{-4}$         | $10^{-3}$         | $10^{-2}$         | $10^{-1}$         | $10^0$            | $10^{-1}$         |
|        | $\frac{E_2}{E_1}$ | $2 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-7}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ |
| 1 мм   | $h, \text{ мкм}$  | $10^{-3}$         | $10^{-2}$         | $10^{-1}$         | $10^0$            | 10                | $10^2$            |
|        | $\frac{E_2}{E_1}$ | $2 \cdot 10^{-2}$ | $2 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-7}$ |
| 10 мм  | $h, \text{ мкм}$  | $10^{-2}$         | $10^{-1}$         | $10^0$            | 10                | $10^2$            | $10^3$            |
|        | $\frac{E_2}{E_1}$ | $2 \cdot 10^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-2}$ | $2 \cdot 10^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ |

обведем жирной чертой свили, не удовлетворяющие первому признаку, а двойной тонкой чертой — не удовлетворяющие второму признаку.

Как видим, из 18 двойных ячеек таблицы только одна оказалась полностью не удовлетворительной; она соответствует свили  $d = 10 \text{ мм}$  при  $\Delta n = 0,0001$ , и такая свиль вредна по обоим признакам. Все же остальные свили оказываются безвредными по одному из двух признаков, а значит, и вообще безвредными.

Подобные таблицы можно составить для различных диаметров объективов ( $D$ ) и различных отношений  $E_2 : E_1$  и убедиться, что одиночные свили совсем не так страшны и вредны, как многие раньше о них думали: в одних случаях они вызовут слишком малую деформацию волнового фронта, чтобы заметно повлиять на качество изображения, а в других случаях они обусловят слишком длинные и вместе с тем бледные хвосты у изображений звезд, а потому эти хвосты не окажутся помехой для наблюдений. Конечно, приведенная выше теория недостаточно строга, а ее условия несколько произвольны.

Если свиль расположена не прямолинейно, а по дуге заметной кривизны, то прежний прямолинейный «хвост» у точечного изображения обращается в двухсторонний «веер», яркость которого по мере удаления от точечного изображения будет быстро падать: криволинейные свили при равенстве остальных условий несколько менее вредны, чем свили прямолинейные.

Так как каждая свиль приводит к образованию хвоста или веера у точечного изображения, причем элементарный хвост перпендикулярен к направлению элемента свили, то при нескольких свилех в стекле отдельные хвосты и веера суммируются. В этом смысле очень вредна паутина из большого количества хотя бы и мелких свилей и, особенно, параллельный поток мелких свилей.

Приведенного материала достаточно, чтобы составить технические условия и допуски на свили в визуальных приборах того или иного назначения. В случае фотографических приборов к решению вопроса нужно подойти несколько иначе: во-первых, вместо допустимой волновой деформации  $\frac{1}{4} \lambda$  следует рассматривать допустимое пятно рассеяния, связываемое с разрешающей силой эмульсии; во-вторых, относительную яркость хвостов следует связывать со свойствами характеристической кривой эмульсии: яркость хвостов должна соответствовать области недодержек тогда, когда яркость точечного изображения переходит явно в область передержек.

Опыт показывает, что неоднородности могут быть следующих видов:

1. Слоистая неоднородность, поражающая большие участки стекла и обусловленная в большинстве случаев химической неоднородностью стекла и в редких случаях неоднородностью физической. В последнем случае стекло не имеет в полном смысле слоистого строения с резкими изменениями показателя преломления на границе двух слоев, но показатель преломления плавно изменяется при переходе от слоя одного уровня к слою другого уровня.

2. Свили — неоднородности в виде местных нитевидных включений всегда химического происхождения.

3. Местные плавные неоднородности, поражающие значительные участки стекла и имеющие самые произвольные контуры без резко обозначенных границ. Это либо бывшие свили и неоднородные области в значительной мере, но не до конца размешанные в стекле, либо, что чаще всего бывает, это физические неоднородности, т. е. результат несовершенного отжига стекла, получившего значительные местные напряжения («натяжения»).

4. Свили, сопровождаемые потоком плавной неоднородности. В этом случае резко очерченная свиль малого диаметра заключена, как фитиль, в свече, в неоднородную оболочку значительно большего диаметра, но с малым  $\Delta n$  и без резко очерченной границы; по-видимому, это бывшие грубые свили, успевшие в значительной мере диффундировать в стекло и не подвергшиеся падающему размешиванию.

5. Потоки значительного числа мельчайших нежных свилей, поражающих большие объемы стекла.

Самыми безобидными, как мы видели, являются одиночные хотя бы и грубые свили. Слоистая неоднородность может оказаться безвредной, если липза удачно ориентировала относительно слоев неоднородности; в противном случае слоистая неоднородность очень вредна. Свили, заключенные в неоднородную оболочку, а также потоки мелких свилей, очень вредны.

Наконец, наиболее вредными являются плавные местные неоднородности большой протяженности. Благодаря малому  $\Delta n$  и большой относительной площади они создают вокруг точечного изображения короткие весьма яркие ореолы самой причудливой

формы, затмевающие дифракционную картину и резко снижающие разрешающую силу прибора.

Так как такие неоднородности в большинстве случаев обусловлены неудовлетворительным отжигом стекла, то особое значение приобретает методика осуществления и контроля «тонкого отжига» оптического стекла. Вопросы тонкого отжига достаточно изучены теоретически и практически, а нашим заводам удавалось хорошо отжигать и освобождать от вредных натяжений стекла не только для средней, но и для крупной оптики.

Светопрозрачность веществ для преломляющей оптики позволяет применять для исследования их натяжений оптические методы. В большинстве случаев, за исключением темных, например, светофильтров, удобно применять визуальный метод исследования натяжений в поляризованном свете.

Теория исследования двойного лучепреломления в анизотропных веществах, к каковым принадлежит и стекло с внутренними натяжениями, хорошо известна из курсов физики и оптики, а потому не будем здесь на ней останавливаться. Но так как исследование стекол для астрономической оптики, особенно для крупной, обладает своей спецификой, то мы кратко рассмотрим рациональную для данного случая схему исследования (рис. 15).

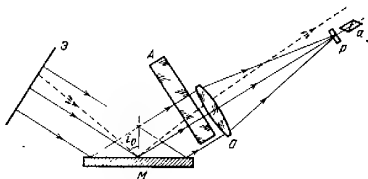


Рис. 15.

Протяженный светлый экран  $\mathcal{E}$  (например, фон облачного неба, или подсвеченное сзади матовое стекло, или конденсор с источником света в фокусе) посылает на зеркало  $M$  пучки лучей, различно наклоненных к зеркалу. Зеркало  $M$  осуществляется в виде зеркального стекла, заматированного и затертого снизу. Если, например, показатель преломления стекла  $n = 1,53$ , то угол полной поляризации  $i_0$ , определяемый по известной формуле

$$\operatorname{tg} i_0 = n, \quad (38)$$

оказывается в нашем случае равным:  $i_0 = 56^\circ 50'$ .

Для того, чтобы в глаз наблюдателя попали только те лучи, которые отразились от зеркала  $M$  под углом полной поляризации, помещаем на пути отраженных пучков лучей объектив  $O$  (свободный от натяжений в своих линзах), в непосредственной бли-

зости к фокусу которого устанавливаем «пластинку в  $\frac{1}{4}$  волны» ( $p$ ) и николь или иной анализатор ( $a$ ); в этом случае всякий луч, падающий на зеркало  $M$  под углом существенно отличным от  $i_0$  (штриховая линия на рисунке), проходит мимо анализатора и в глаз не попадает. Установка собрана правильно, если при николе  $a$ , «скрещенном» относительно зеркала  $M$ , наступает достаточно полное и равномерное затемнение поля; в противном случае либо зеркало  $M$  наклонено не надлежащим образом, либо николь установлен неправильно относительно фокуса объектива.

Зеркало  $M$  рекомендуется потому, что для наших целей желательны протяженные поля, которые практически недостижимы при применении поляризационных призм; успехи техники последних лет позволяют заменить зеркало поляроидом: поляроид несколько уступает зеркалу в смысле чистоты и качества наблюдаемой картины, но в то же время дает выигрыш в ее яркости, так как коэффициент пропускания поляроида выше коэффициента отражения стеклянного зеркала. В качестве анализатора выгоднее всего применить поляризационную призму: потери света в ней малы, а размеры ее должны быть достаточно лишь для пропускания в глаз пучков, заполняющих глазной зрачок, так как всякое дальнейшее увеличение размеров призмы не приносит повышения яркости наблюдаемой картины и ведет к все большему и большему отступлению от условия полной поляризации (увеличенно  $\pm \Delta i_0$ )\*).

Если исследуемый диск стекла  $A$  идеально отожжен, т. е. является телом вполне изотропным и свободным от двойного лучепреломления, то находится ли он на пути лучей или удален, — отраженный от зеркала  $M$  свет остается плоско-поляризованным и при соответственно ориентированном анализаторе  $a$  может быть полностью погашен.

Но в случае анизотропного исследуемого изделия  $A$  (обладающего двойным лучепреломлением) проходящий через него свет оказывается эллиптически-поляризованным; вот почему для превращения такого света снова в плоско-поляризованный свет приходится ввести «пластинку  $\frac{1}{4} \lambda$ », соответственным образом ориентированную. Теперь анализатор  $a$  получит возможность отличить эллиптически-поляризованный свет от частично-поляризованного, а измерение на лимбе угла дополнительного поворота николя, приводящего снова к затемнению некоторого данного участка поля, позволяет определить двойное лучепреломление в данном участке стекла  $A$ , т. е. найти внесенную этим участком разность хода ( $h$ ) между обыкновенным и необыкновенным лучами, а отсюда и разность ( $\delta$ ) между показателями этих двух лучей.

\* Возможна также схема с большим вогнутым сферическим зеркалом, поляризатором и анализатором вблизи центра кривизны зеркала (у светящейся точки и у глаза) и с испытуемым стеклом вблизи зеркала.

Величину  $\delta$  определяем по формуле:

$$\delta \approx \frac{3\alpha}{l} \cdot 10^{-6}, \quad (39)$$

где  $\alpha$  — выраженный в градусах угол необходимого дополнительного поворота анализатора, приводящего к затемнению исследуемого участка образца  $A$ , и  $l$  — выраженная в миллиметрах толщина образца в направлении хода лучей через него.

Так как длина оптического пути равна произведению показателя преломления на геометрическую длину пути ( $l$ ), то разность хода ( $h$ ) между обыкновенным и необыкновенным лучами равна

$$h = \delta l. \quad (40)$$

Так как в диске стекла, из которого мы предполагаем изготовить линзу объектива, величины  $h$  и  $\delta$  прогрессивно возрастают от центра диска к его внешней зоне и притом приблизительно пропорционально квадрату зоны диска ( $y^2$ ), то в центре диска  $h \approx 0$  и достигает максимального значения на внешней зоне ( $y = \frac{D}{2}$ , где  $D$  — диаметр диска или будущего объектива). Поэтому

из объектива, изготовленного из плохо отожженного стекла, выйдут в действительности две волны и будут соответственно иметь два фокуса вдоль оптической оси. Мы знаем, что наблюдаемое глазом изображение звезды должно в этом случае заметно пострадать, если отклонение одной волны от другой ( $h_{\max}$ ) превысит  $\frac{1}{4} \lambda$ .

Поэтому, принимая  $\lambda = 0,555$  мкм и приравнявая выражению (40) четверти волны, находим:

$$\delta_{\max} \approx \frac{0,00014}{l}. \quad (41)$$

Так как эта величина равна  $\Delta n_{\max}$  выражения (23), то числа табл. 4 одновременно будут характеризовать допустимую разность показателей преломления ( $\delta_{\max}$ ) обыкновенного и необыкновенного лучей в зависимости от толщины  $l$  изделия в направлении хода лучей.

Так, для объектива диаметром 100 мм, имеющего толщину линз  $l \approx 14$  мм, можно допустить  $\delta \approx 10^{-5}$  для каждой из его линз и не бояться заметного снижения качества изображения в силу рассмотренного выше явления.

К сожалению, этим еще не исчерывается все зло, приносимое внутренними напряжениями стекла. В стекле с напряжениями не только появляется двойное лучепреломление, но и изменение величины показателя преломления обыкновенного луча.

Если  $n$  — показатель преломления стекла без натяжений и если  $n_0$  и  $n_s$  — показатели преломления стекла с натяжениями для обыкновенного и необыкновенного лучей, то между ними

оказывается следующая зависимость:

$$n_0 = n + \gamma + \delta, \quad n_e = n + \gamma. \quad (42)$$

В некоторых стеклах, например, в кроках, общее изменение ( $\gamma$ ) показателя преломления стекла с натяжениями сравнительно невелико и не на много превосходит  $\delta$ , в других же стеклах, например, в тяжелых флинтах, величина  $\gamma$  во много раз превышает величину  $\delta$ .

В результате стекло с натяжениями оказывается не только двокопреломляющим, но и неоднородным в самом обычном смысле слова. Так как  $\gamma$  может значительно превышать  $\delta$ , то одного знания величины  $\delta$  совершенно недостаточно для суждения о пригодности заготовки стекла; по той же причине допуск (41) теряет свой смысл: он должен быть значительно ужесточен и притом в зависимости от сорта стекла.

Наконец, стекло с натяжениями изменяет форму своей поверхности, во-первых, с изменением температуры и, во-вторых, при последующей обработке (распиловке, шлифовке, центрировке), так как при этом перераспределяются внутренние напряжения, вызывающие дополнительную деформацию изделия. Первое особенно предно сказывается на астрономических зеркалах; второе может заметным образом испортить качество объектива, если для центрировки его линз применен общепринятый метод: сперва полируются поверхности линз в окончательную форму, а затем линзы центрируются на центрировочном станке. Вот почему я давно ввел в практику обратный метод: сперва придаю грубую форму линзе и окончательно ее круглю. Затем в процессе тонкой шлифовки центрирую ее и, наконец, полирую ее поверхности с необходимой точностью; тем же путем следует идти и при изготовлении зеркал.

В виде иллюстраций приведу пример из одной моей работы \*). На заводе был специально изготовлен диск из стекла К-8; диаметр диска 105 мм, толщина около 14 мм. Этот диск был в сильной степени закален так, что в точках на внешней зоне величина  $\delta$  превосходила  $10^{-5}$ , а в одной точке достигла даже значения  $10^{-6}$ . Обе поверхности диска удалось отполировать плоскими с оптической точностью. Затем возле участка с максимальными натяжениями был отпилен сегмент со стрелкой 10 мм: при этом пришлось принять меры особой предосторожности, чтобы стекло во время обработки не раскололось на мелкие части. Далее была сфотографирована и затем измерена картина интерференционных полос, появившихся между поверхностью диска и плоской пробой. Исследование вопроса показало, что после отделения от диска сравнительно небольшого сегмента перераспределившиеся напряжения вызвали нерегулярные и очень грубые деформации на каждой из поверхностей, обратив поверхности из плоских в выпуклые с рельефом, изображенным на рис. 16; при этом максималь-

\*) Максимова Д. Д. Отчет по работе 1934 г.

ные деформации на каждой из поверхностей составили около 3,3 мкм. Последняя величина в  $\sim 50$  раз больше допуска на ошибки первоклассного зеркала, а потому приблизительно во столько же раз следовало бы снизить  $\delta_{\max}$  ( $10^{-6} : 50 = 2 \cdot 10^{-8}$ ), чтобы, в случае изготовления из данного диска астрономического зеркала, не опасаться деформаций его поверхности при последующей холодной обработке. Кроме того, при изменении температуры форма поверхности этого диска резким образом и совершенно нерегулярно изменялась. Ни одного, ни другого явления мы не обнаружили с таким же вторым диском, в котором путем тонкого отжига удалось осуществить  $\delta_{\max} = 5 \cdot 10^{-7}$ .

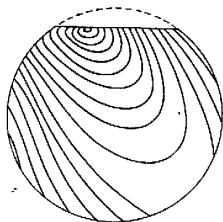


Рис. 16.

Неудивительно поэтому, что для первой категории отжига принято устанавливать предел  $\delta_{\max} = 4 \cdot 10^{-7}$ .

Во многих случаях крупной астрономической оптики приходится стремиться к этому пределу: в случае преломляющей оптики, и особенно флинтовой, — по одним соображениям, в случае зеркальной оптики — по другим соображениям.

При исследовании заготовок стекла для астрономической оптики контроль натяжений, конечно, необходим. Но он, как мы видели, не решает еще вопроса о степени оптической однородности стекла. В конце концов, мастеру оптику безразлична причина неоднородностей стекла; как физические, так и химические неоднородности снижают качество изображения, а чтобы с этим бороться, мастер вынужден выполнять местную ретушь на поверхностях оптического изделия; эта ретушь в одних случаях легко достижима при малых неоднородностях стекла или при благоприятной их форме или ориентировке, а в других случаях она недостижима даже для наиболее искусных мастеров. Поэтому решающим исследованием является исследование заготовки стекла на свили и неоднородность, для чего, как мы увидим дальше, наиболее рациональным является теневой метод исследования.

Перечисленные свойства, вернее, дефекты оптического стекла — светопоглощение, натяжения, оптическая неоднородность — могут изменяться в самых широких пределах в зависимости от принятой технологии всяких случайностей. То же следует сказать и о других менее серьезных дефектах — «пузырях», «камнях», «дымках», которые, в умеренных количествах, практически не влияют на качество изображения. Для всех этих дефектов нижним пределом является нуль; но так как такой предел на практике недостижим, то производство оптического стекла устанавливает категории допусков на каждый из дефектов, а оптик имеет возможность требовать стекло необходимого ему качества или, во

всяком случае, находить компромисс между качеством стекла, его стоимостью и длительностью или даже вероятностью возможности его изготовления.

Теперь перейдем к свойствам стекол, зависящим от их химического состава, определяющего «сорт» стекла, а потому почти не изменяющимся при переходе от одной плавки данного сорта стекла к другой. Если бы химический состав стекла данного сорта не претерпевал случайных и незначительных изменений в процессе производства, то многие из этих свойств могли бы быть охарактеризованы константами в строгом смысле слова. Хотя это в действительности не так, но мы удержим за численными выражениями некоторых достаточно постоянных свойств стекол термин констант. нас будут интересовать два вида констант: а) общие константы, определяющие физические, механические и химические свойства, и б) оптические константы в строгом смысле слова.

Из общих констант нас могут интересовать следующие:

1. *Удельный вес ( $d$ )*, определяющий вес изделия, его давление на опорные поверхности в оправе, прогибы самого изделия под действием собственного веса, прогибы опор, несущих на себе оптическое изделие и т. д.

2. *Коэффициент теплового расширения ( $\alpha$ )*, позволяющий судить об изменении формы изделия при изменениях температуры, о возможности сочетать две линзы из разных сортов стекла путем склейки или посадки на контакт, о необходимых температурных зазорах между изделием и его оправой, о температурных изменениях фокусного расстояния и т. д.

3. *Температуропроводность ( $q$ )*, о значении которой было достаточно сказано в главе II.

4. *Упругость (модуль  $E$ )*, позволяющая решать задачи о деформации изделия не только под действием перемены температуры, но и под действием собственного веса и внешних усилий во время обработки изделия на станке.

5. *Твердость*, влияющая отрицательно в процессе шлифовки и положительно в процессе полировки и определяющая долговечность изделия в эксплуатации.

6. *Химическая стойкость* по отношению к воде, а также и к другим веществам, определяющая не только долговечность изделия, но и в значительной мере выбор рационального технологического процесса обработки (ускорители полировки, борьба с «налетами», нанесение поверхностных пленок и т. д.).

Основными оптическими константами стекла являются его показатели преломления ( $n_\lambda$ ) для лучей различной длины волны. Зная эти константы, можно вычислить ряд производных оптических констант, например, частные дисперсии:

$$n_{\lambda_2} - n_{\lambda_1}; \quad (43)$$

или коэффициент дисперсии:

$$\frac{1}{v} = \frac{n_{\lambda_2} - n_{\lambda_1}}{n_{\lambda_{\text{ж}}} - 1}, \quad (44)$$



где  $\lambda_0$  — длина волны, средняя между  $\lambda_2$  и  $\lambda_1$  и близкая к  $\frac{\lambda_2 + \lambda_1}{2}$ ; или величину обратную, которая, в частном случае:  $\lambda_2 = F$ ;  $\lambda_1 = C$ ;  $\lambda_0 = D$  \*), называется *числом Аббе*,

$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}; \quad (45)$$

или относительные дисперсии:

$$\gamma = \frac{n_{\lambda_2} - n_{\lambda_1}}{n_{\lambda_4} - n_{\lambda_3}}. \quad (46)$$

Для визуальной оптики рационально принимать:

$$\left. \begin{aligned} &\text{за средний показатель преломления } n_D^{**}); \\ &\text{за среднюю частную дисперсию } n_F - n_C; \\ &\text{за относительную дисперсию } \gamma_\lambda = \frac{n_D - n_\lambda}{n_F - n_C}; \\ &\text{за обратный коэффициент дисперсии число} \\ &\text{Аббе } v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}; \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Для оптики с другим видом коррекции рационально переходить в соответственный спектральный интервал, считая за средний показатель преломления  $n_{\lambda_0}$  такой, при котором  $\lambda_0$  соответствует волне вершины хроматической кривой и наилучшего направления аберраций; в этом случае  $\lambda_2$  и  $\lambda_1$ , подобно F и C, подбираются так, чтобы  $\lambda_0$  оказалось приблизительно посередине спектрального интервала  $\lambda_2 - \lambda_1$ . Если известны основные константы  $n_\lambda$ , то вычисление любых производных констант не представляет труда.

Рациональный каталог оптического стекла, применительно к системам с визуальной коррекцией (для частного случая стекол K-8 и Ф-2) мог бы быть составлен по форме, данной в табл. 6.

Величины  $\gamma_\lambda$  и  $v$  желательно выражать четырьмя значащими цифрами, для чего показатели преломления следует измерять с точностью не меньшей, чем  $\Delta n_\lambda = \pm 1 \cdot 10^{-5}$ . К сожалению, в некоторых каталогах отсутствует значение  $n_D$  ( $\lambda_D = 0,4047$  мкм), что является их существенным недостатком. Тем более многие каталоги не дают сведений об оптических константах стекла ни в инфракрасной, ни в ультрафиолетовой областях спектра; поэтому существенно необходимо дополнять такие каталоги константами по крайней мере еще для двух длин волн: некоторой длины волны  $\lambda$ , во всяком случае большей 0,7 мкм, и некоторой

\*) Указанным здесь и ниже спектральным линиям соответствуют длины волн: C — 0,6563 мкм, D — 0,5893 мкм, F — 0,4861 мкм, G' — 0,4340 мкм, H — 0,4047 мкм. (Прим. ред.)

\*\*) Строже и рациональнее вопреки традиции принимать вместо  $n_D$   $n_{\lambda_0}$ , где  $\lambda_0 = 555$  нм.

Таблица 6

| Сорт стекла | Показатели преломления $n_\lambda$       |         |                          |         |                                |                          |                          | Средняя дисперсия | Число Аббе |
|-------------|------------------------------------------|---------|--------------------------|---------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|------------|
|             | Относительные дисперсии $\gamma_\lambda$ |         |                          |         |                                |                          |                          |                   |            |
|             | $\frac{n_x-1}{\gamma_x}$                 | $n_C-1$ | $\frac{n_D-1}{\gamma_D}$ | $n_F-1$ | $\frac{n_{G'}-1}{\gamma_{G'}}$ | $\frac{n_h-1}{\gamma_h}$ | $\frac{n_y-1}{\gamma_y}$ | $n_F-n_C$         | $v$        |
| К-8         | $\frac{?}{?}$                            | 0,51390 | $\frac{0,51630}{0,7022}$ | 0,52196 | $\frac{0,52646}{-0,5583}$      | $\frac{?}{?}$            | $\frac{?}{?}$            | 0,00806           | 64,06      |
| Ф-2         | $\frac{?}{?}$                            | 0,61160 | $\frac{0,61640}{0,7150}$ | 0,62844 | $\frac{0,63869}{-0,6087}$      | $\frac{?}{?}$            | $\frac{?}{?}$            | 0,01684           | 36,60      |

длины волны  $y$ , близкой к 0,35 мкм. После этого пробелы каталога, отмеченные знаком вопроса, будут восполнены \*).

Каталог следует развить добавлением физико-механических констант приблизительно по схеме, данной в табл. 7.

Таблица 7

| Сорт стекла | Удельный вес | Коэффициент расширения | Температура проводимости | Модуль упругости | Твердость | Химическая стойкость |
|-------------|--------------|------------------------|--------------------------|------------------|-----------|----------------------|
|             | (d)          | ( $\alpha$ )           | ( $q$ )                  | E                |           |                      |
|             |              |                        |                          |                  |           |                      |

Все константы следует относить к температуре 0°C, так как это есть приблизительно средняя температура, при которой производятся астрономические наблюдения, и так как она достаточно близка к температуре, при которой производится обработка оптических деталей (20°C). Твердость стекла интересна не только в отношении скорости шлифования, но и в отношении устойчивости против царапания, а это, вообще говоря, две различные твердости. О химической стойкости было сказано выше, здесь же можно прибавить, что для ее однозначного определения пока не выработано достаточно удачных методов.

Все, что было сказано о стекле, должно быть повторено с необходимыми специфическими дополнениями и для кристаллов и для прозрачных пластических масс. О кристаллах мы имеем достаточно полные сведения, и их «константы», как это само собой понятно, более постоянны, чем у стекол. О пластмассах мы имеем менее полные сведения, а между тем они обещают много интересного в применении к некоторым оптическим приборам.

\*) Каталог отечественных оптических стекол приведен в ГОСТ 13659—78.—М.: Изд. стандартов, 1979. Очень хорошим является Советско-германский каталог «Оптическое стекло. Optisches Glass». (Прим. ред.)

Мне кажется, что я не сильно ошибусь, утверждая, что крупные рефракторы отжили свой век и не возродятся, по крайней мере до тех пор, пока не будут разработаны существенно новые благоприятные прозрачные вещества, освобождающие линзовую оптику от остаточного хроматизма. Объективы средних размеров, конечно, будут функционировать, находя применение в различных астрономических инструментах; но Ликского или Йерского рефрактора пока никто серьезно не предполагает повторить.

Новый тип «менисковых телескопов» позволяет осуществлять весьма совершенные заменители рефракторов с исключительно малыми продольными размерами даже при очень больших фокусных расстояниях и исключительно высоким качеством изображения.

Для менисковых же телескопов оптические константы вещества мениска в значительной степени безразличны. Для них необходимо только вещество оптически однородное, хорошо пропускающее свет, технологически легкое и обладающее выгодными физико-механическими и химическими свойствами.

По некоторым соображениям мы до сих пор базировались для этих целей на стекле К-8, но несомненно, что среди большого разнообразия наших стекол можно найти еще более выгодный сорт стекла для менисков. Такой выбор должны произвести оптик вместе с химиком, физиком, технологом и экономистом.

Крупные менисковые телескопы часто бывает желательно снабжать объективной спектральной призмой того же диаметра, что и мениск, т. е. в пределе до  $1 - 1\frac{1}{4}$  м. К стеклу для объективной призмы предъявляют три основных условия: 1) оптической однородности, 2) возможно большей дисперсии, 3) возможно меньшего светопоглощения (особенно в коротковолновой части спектра). Два последних условия идут вразрез одно другому, а потому надлежит найти компромиссное решение и выработать сорт флинта (о пластмассах для объективных призм пока говорить преждевременно), наилучшим образом удовлетворяющего этим трем условиям: по-видимому, это будет не «тяжелый» и не «легкий», а «средний увиолевый флинт».

Таким образом, только два сорта оптического стекла смогут обеспечить производство всей крупной астрономической оптики на ближайшие годы или десятилетия\*). Для средней и мелкой оптики инструментов и их вспомогательного оборудования мы можем использовать весьма широкий ассортимент оптических материалов, не опасаясь чрезмерного влияния отрицательных свойств этих материалов только потому, что размеры этой оптики относительно малы.

\*) Это справедливо для простых двухлинзовых объективов. Более сложные объективы широкоугольных астрографов требуют расширения ассортимента стекол, вплоть до применения стекол типов лангкран и курцфлинт (см. *Максудов Д. Д. Астрономическая оптика*/2-е изд. — М.: Наука, 1979, гл. 13, 17 и 18). Кроме того, для коррекционных элементов (мениски, пластины Шмидта, корректоры к параболическим рефлекторам и рефлекторам Риччи — Кретьена) используется оптически прозрачный однородный плавленый кварц. (Прим. ред.)

## ДЕФОРМАЦИИ И РАЗГРУЗКА ОПТИКИ

С одной из очень вредных температурных деформаций — эффектом края — мы уже ознакомились. В линзовом объективе, рассуждая теоретически, эта деформация почти столь же вредна\*), что и в объективе зеркальном. Действительно, хотя отражающая поверхность допускает в  $\sim 4$  раза меньшую деформацию по сравнению с преломляющей поверхностью (при  $n \sim 1,5$ ), но в обычном астрономическом объективе таких поверхностей четыре, и на каждой из них мы можем ожидать эффект края одинакового знака: «подворот» края — при повышении температуры и «завал» края — при ее понижении.

Если все же мы редко слышим жалобы на эффект края в объективах, то причины к тому следующие:

1. В объективах только первая (наружная) поверхность находится в непосредственном соприкосновении с внешним воздухом, т. е. в таких же неблагоприятных условиях, что и зеркало рефлектора, тогда как три другие поверхности сравнительно защищены от резких перемен температуры. Кстати сказать, по той же причине в менисковом телескопе, при равенстве остальных условий, зеркало и качество изображения меньше страдают от эффекта края, чем в открытом чисто зеркальном телескопе.

2. Линзы объектива, как правило, относительно тоньше, чем зеркало рефлектора.

3. Предельные размеры объективов не могут конкурировать с предельными размерами зеркал. Если Йеркский рефрактор с объективом диаметра 1 м может быть назван гигантом среди инструментов этого рода, то рефлектор с зеркалом диаметром 1 м может быть назван в наше время рефлектором среднего размера. А если зеркало относительно крупнее объективов, то мы часто должны слышать об эффекте края зеркал и редко об эффекте края объективов.

4. В крупных объективах из-за дефектов стекла и из-за вторичного спектра качество изображения обычно низкое, а потому трудно уловить дополнительное ухудшение плохого по своей природе изображения.

---

\*) Эффект края достигает очень больших и вредных значений в призмах в силу их значительных толщин и неблагоприятной геометрической формы.

Рассмотрим в идеальном виде еще один эффект температурной деформации\*). Допустим, что плоскопараллельный диск рис. 17 имеет диаметр  $D$ , толщину  $l$  и коэффициент расширения  $\alpha$ . Поставим его в условия, при которых в течение неопределенно долгого времени поддерживается температура  $t$  у его левой поверхности и температура  $t + \Delta t$  у его правой поверхности. В этом

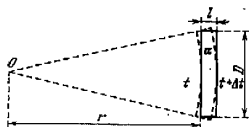


Рис. 17.

случае в толще стекла установится постоянный температурный градиент, а каждый элементарный слой диска будет обладать постоянной температурой, возрастающей от  $t$  до  $t + \Delta t$  по мере перемещения от левой поверхности к правой. В результате диск будет стремиться искривиться и принять форму, показанную прерывистой линией; при этом разность диаметров правого и левого оснований диска будет

$$\Delta D = D\alpha\Delta t. \quad (48)$$

Плоский диск стремится, таким образом, принять форму концентрического мениска с центром кривизны в точке  $O$  и с радиусом кривизны (в предположении, что  $l \ll r$ )

$$r = \frac{l}{\alpha\Delta t}. \quad (49)$$

Плоская поверхность диска приобрела кривизну со стрелкой кривизны

$$\Delta x = \frac{D^2\alpha\Delta t}{8l}. \quad (50)$$

Отсюда сделаем ряд интересных практических выводов.

1. Плоское целостатное зеркало перестает быть плоским и приобретает стрелку кривизны ( $\Delta x$ ), если его лицевая и задняя поверхности имеют различные температуры. Такое различие температур может достигать весьма существенных значений в случае наблюдений Солнца, когда лицевая поверхность целостатного зеркала облучается Солнцем, а задняя находится в тени. Примем для стекла прелекс  $\alpha = 32 \cdot 10^{-7}$ , примем относительную толщину зеркала в одном случае  $l:D = 1:8$  и в другом случае  $l:D = 1:4$ , и составим табл. 8 для стрелки  $\Delta x$  в зависимости от разности температур  $\Delta t$  между лицевой и задней поверхностями зеркала и от диаметра  $D$  зеркала.

Если бы пучки лучей падали на зеркало нормально, то появление у зеркала небольшой общей кривизны не могло бы повлиять на качество изображения. Но целостатные зеркала работают

\*) Этот вопрос был рассмотрен Д. Д. Максудовым (Цирк. ГАО в Пулковно, 1936, № 20) и Г. Г. Сяусаревым (Оптика и спектроскопия, 6, № 2, с. 211, 1959). (Прим. ред.)

в наклонных пучках, а потому даже небольшая их кривизна приводит к заметному астигматизму. Мы не будем здесь исследовать очень интересный вопрос о допустимой кривизне первоклассного плоского зеркала и о значении угла падения, при котором кривизна зеркала сильнее всего влияет на качество изображения. Вместо этого мы сильно упростим задачу, указав несколько преуменьшенно строгий допуск для  $\Delta x = \lambda_0 : 8 = 0,07$  мкм, при котором во всяком случае кривизна зеркала не может испортить изображения при любых наклонах зеркала к падающему пучку. Соответственно в табл. 8 области, не удовлетворяющие этому допуску, отделим жирной чертой (правая часть таблицы).

Таблица 8

$$[\Delta x \approx 4 \cdot 10^{-4} D \cdot \Delta t \left( \frac{D}{l} \right)^{1/2}, \text{ мкм}]$$

| $\frac{D}{l}$ | 0,1   | 0,3   | 1    | 3    | 10  | $\frac{l}{D}$ |
|---------------|-------|-------|------|------|-----|---------------|
| 100           | 0,016 | 0,048 | 0,16 | 0,48 | 1,6 | 1 : 4         |
|               | 0,032 | 0,096 | 0,32 | 0,96 | 3,2 | 1 : 8         |
| 300           | 0,048 | 0,144 | 0,48 | 1,44 | 4,8 | 1 : 4         |
|               | 0,096 | 0,288 | 0,96 | 2,88 | 9,6 | 1 : 8         |
| 1000          | 0,16  | 0,48  | 1,6  | 4,8  | 16  | 1 : 4         |
|               | 0,32  | 0,96  | 3,2  | 9,6  | 32  | 1 : 8         |

Как видим из таблицы, только небольшие зеркала и при разностях температур в десятые доли градуса не приобретают вредной кривизны. Чем относительно толще зеркало, тем это выгоднее для целостного зеркала в смысле уменьшения его общей кривизны и вносимого ею астигматизма. Но мы помним, что увеличение толщины зеркала способствует повышению эффекта края. Из этого заколдованного круга для крупных целостных и диагональных зеркал мы не находим вполне хорошего выхода\*). Оправу зеркала, конечно, следует конструировать так, чтобы задняя поверхность зеркала была доступна естественной вентиляции воздухом (при ночных наблюдениях) и искусственному облучению солнечным светом от вспомогательного зеркала (при солнечных наблюдениях). Чтобы поставитьлицевую и тыльную поверхности зеркала в возможно более разные условия, еще Ричи применял серебрение тыльной поверхности крупных зеркал\*\*). Всякая искусственная вентиляция лицевой поверхности зеркал во время наблюдения, способная создать потоки неоднородного воздуха на пути действующих лучей, недопустима.

\*) Разработка ситалла, у которого  $\alpha = \pm 1 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}$  или даже меньше, позволила решить эту проблему. (Прим. ред.)

\*\*) Однако вряд ли эта мера достаточно эффективна.

2. Однопочное вогнутое параболическое зеркало изменяет свою кривизну, вместе с тем и положение фокуса. Пусть  $D$  — диаметр зеркала и  $f$  — его фокусное расстояние, откуда полная стрелка зеркала

$$x = \frac{D^2}{16f}. \quad (51)$$

Допустим, что между задней и лицевой поверхностями зеркала поддерживается постоянная разность температур  $\Delta t$ . Тогда стрелка лицевой поверхности увеличится согласно (50) на  $\Delta x$  и соответственно фокусное расстояние изменится (укоротится) на величину  $\Delta f$ , равную

$$\Delta f = - \frac{2f^2 \alpha \Delta t}{l \left( 1 + \frac{2f \alpha \Delta t}{l} \right)}. \quad (52)$$

Так как величины  $\alpha$  и  $\Delta t$  малы, то даже при значительном  $f:l$  двучлен, стоящий в знаменателе в скобках, мало отличается от единицы, а потому мы имеем право переписать найденную зависимость в виде

$$\Delta f \approx - \frac{2f^2 \alpha \Delta t}{l}. \quad (53)$$

Так, в параболическом зеркале толщины  $l$  и фокусного расстояния  $f$  при  $\alpha = 32 \cdot 10^{-7}$  и при  $\Delta t$ , соответственно равном  $0^\circ,1$

Таблица 9

[Величина  $(-\Delta f)$  в мкм при  $\alpha = 32 \cdot 10^{-7}$ ]

| $f \backslash l$ | 300   | 100   | 30   | 10     | $\Delta t$  |
|------------------|-------|-------|------|--------|-------------|
| 300              | 0,192 | 0,576 | 1,92 | 5,76   | $0^\circ,1$ |
|                  | 0,576 | 1,73  | 5,76 | 17,3   | $0^\circ,3$ |
| 1000             | 2,13  | 6,4   | 21,3 | 64     | $0^\circ,1$ |
|                  | 6,4   | 19,2  | 64   | 192    | $0^\circ,3$ |
| 3 000            | 19,2  | 57,6  | 192  | 576    | $0^\circ,1$ |
|                  | 57,6  | 173   | 576  | 1 730  | $0^\circ,3$ |
| 10 000           | 213   | 640   | 2130 | 6 400  | $0^\circ,1$ |
|                  | 640   | 1920  | 6400 | 19 200 | $0^\circ,3$ |

и  $0^\circ,3$ , можно ожидать смещений фокуса  $\Delta f$ , приводимых в табл. 9.

Как видим, в короткофокусных зеркалах значительной толщины смещение фокуса из-за разности температур между лицевой и тыльной поверхностями зеркала измеряется долями микрометра,

тогда как в зеркалах длиннофокусных малой толщины эти смещения могут достигать многих миллиметров.

Решим следующую задачу: задано вогнутое параболическое зеркало  $f = 10\,000$  мм,  $l = 100$  мм из стекла пирекс ( $\alpha_1 = 32 \cdot 10^{-7}$ ), смонтированное в телескопе со стальной трубкой ( $\alpha_2 = 110 \cdot 10^{-7}$ ).

Требуется определить необходимую перефокусировку  $\Delta$  после того, как температура окружающего воздуха упала на  $\Delta t' = -5^\circ$  и при условии, что между тыльной и лицевой поверхностями установилась разность температур  $\Delta t'' = 0^\circ,1$ . Эффекта края мы не учитываем, а для упрощения задачи делаем неправдоподобное предположение о сверхвысокой теплопроводности стальной трубы телескопа и материала зеркала.

Если при первоначальной температуре фотопластинка находилась в фокусе телескопа, то с падением температуры на  $5^\circ$  фокусное расстояние зеркала укоротилось на

$$\Delta_1 = f\alpha_1\Delta t' = 160 \text{ мкм},$$

но при этом и длина трубы телескопа, определяемая фокусным расстоянием зеркала, стала короче на

$$\Delta_2 = f\alpha_2\Delta t' = 550 \text{ мкм}.$$

Труба укоротилась сильнее, чем фокусное расстояние, а поэтому пластинку следует перефокусировать, удалив ее от зеркала на величину

$$\Delta' = \Delta_2 - \Delta_1 = 390 \text{ мкм}$$

или, в общем виде и с учетом правила знаков,

$$\Delta' = (\alpha_1 - \alpha_2)f\Delta t'. \quad (54)$$

Но кроме рассмотренной сейчас температурной помехи имеет место еще и другая: так как  $\Delta t'' = 0^\circ,1$ , то фокусное расстояние зеркала укоротится согласно (53) на величину

$$\Delta'' = \frac{2f^2\alpha_1\Delta t''}{l} = 640 \text{ мкм}.$$

В результате фотопластинку следует не удалить от зеркала на 390 мкм, а приблизить к зеркалу на  $640 \text{ мкм} - 390 \text{ мкм} = 250 \text{ мкм}$ ; или в общем виде окончательная перефокусировка  $\Delta$ , с учетом правила знаков, равна

$$\Delta = f \left[ \frac{2f}{l} \alpha_1 \Delta t'' + (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta t' \right], \quad (55)$$

где  $f$  — фокусное расстояние вогнутого зеркала (по правилу знаков величина отрицательная),  $l$  — его толщина,  $\alpha_1$  — его коэффициент расширения,  $\alpha_2$  — коэффициент расширения трубы



телескопа,  $\Delta t'$  — изменение температуры окружающего воздуха,  $\Delta t''$  — разность температур между тыльной и лицевой поверхностями зеркала.

При этом, конечно, совершенно не учтен ни эффект края, ни деформации поверхности, связанные с температурными напряжениями в зеркале, плохо проводящем тепло. Эти эффекты потребуют в действительности дополнительной перефокусировки, и притом весьма значительной, и, кроме того, неизбежно снижат качество изображения, особенно если снижение температуры на  $\Delta t'$  происходило быстро.

Значительно сложнее расчет перефокусировки в сложных телеобъективных системах телескопов (Грегори, Кассегрен). Но и он, нужно думать, не представит теперь для читателя принципиальных трудностей. Не останавливаясь подробно на таких расчетах, скажу только, что сложные системы зеркальных телескопов открывают широкие возможности для применения принципа температурной компенсации: варьируя коэффициенты расширения материалов трубы, главного зеркала и зеркала вторичного, а также соотношение кривизны двух зеркал, можно не только осуществить постоянство положения фокуса относительно трубы, но и постоянство масштаба изображения. Больше того, можно заставить изменяться масштаб изображения по тому же закону, по которому изменяются размеры фотопластины с изменением температуры. В последнем случае, как это мной отмечалось, астроном освободится не только от необходимости выполнять частые, утомительные и небезвредные перефокусировки во время экспозиции, но и от учета температуры, при которой производилась экспозиция.

3. В линзовом объективе первая линза находится в неблагоприятных температурных условиях. При падающей температуре воздуха во время ночных наблюдений наружная поверхность линзы холоднее поверхности внутренней, или, иными словами, здесь имеет место разность  $\Delta t'' > 0$ . При солнечных наблюдениях следует ожидать обратного явления. В результате линза изгибается, и если она по форме не слишком сильно отличается от плоскопараллельного диска, то к ней можно применить выражение (50). Если бы стрелка изменилась на величину  $\Delta z$  только у одной передней поверхности, то у линзы заметно изменилась бы и оптическая сила, и хроматическая аберрация, и аберрация сферическая; соответственно объектив изменил бы фокусное расстояние и аберрационные свойства. Но на такую же величину  $\Delta z$  и в ту же сторону (например, вправо) изменится стрелка и у второй поверхности линзы, а потому, в первом приближении, линза не изменит своей оптической силы и хроматических свойств, и лишь на ничтожно малую величину она изменит сферическую аберрацию. Отсюда делаем заключение, что даже весьма значительные разности температур  $\Delta t''$  практически безвредны для линзовой оптики (эффект края и напряжения в линзе нами при этом, конечно, не учтены).

Значительно вреднее для линзового объектива общее изменение его температуры ( $\Delta t$ ). В этом случае изменяются геометрические размеры линз в зависимости от коэффициентов расширения  $\alpha'$  и  $\alpha''$  кроновой и флинтовой линз, причем в общем случае  $\alpha'$  не равно  $\alpha''$ . Но, кроме того, с изменением температуры изменяются оптические константы стекла, а значит, фокусное расстояние объектива претерпевает по этой причине новое дополнительное изменение. Наконец, изменение температуры влечет за собой появление напряжений в стекле, в свою очередь изменяющих показатели преломления стекол и фокусное расстояние объектива \*).

Если последний эффект трудно поддается расчету, то первые два определяются достаточно просто: для этого нужно только знать коэффициенты расширения стекол и температурные коэффициенты их показателей преломления. Здесь также открываются широкие возможности для применения принципа температурной компенсации и использования наиболее выгодных сочетаний материалов для каждой из линз и для трубы рефрактора \*\*).

Перейдем к другому виду деформации, которые, в отличие от температурных, могут быть названы механическими деформациями. Во-первых, это деформации изделия под действием собственного веса; во-вторых, это деформации от воздействия внешних нагрузок при обработке изделия; в третьих, это деформации от заклинивания или зажимания изделий в гнезде оправы.

Деформации от собственного веса давно и подробно изучаются астрономами и оптиками, так как они могут губительно отражаться на качестве изображений, особенно, в случае крупных астрономических зеркал. При изложении вопроса я многое буду заимствовать от большого знатока этого дела, французского оптика А. Кудера \*\*\*).

Расположим плоскопараллельный круглый диск (рис. 18) веса  $P$  под углом  $Z$  к горизонту; разложим силу  $P$  на две составляющие:

$$P_a = P \cos Z, \quad P_b = P \sin Z. \quad (56)$$

Составляющая  $P_a$  передает часть веса диска «задним» опорам (а); составляющая  $P_b$  передает часть веса диска «боковым» опо-

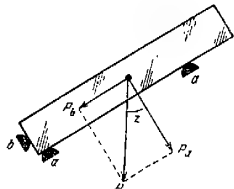


Рис. 18.

\*) Изменение оптических параметров объективов в зависимости от температуры рассматривали Г. Г. Слюсарев (Методы расчета оптических систем.— Л.: Машиностроение, 1969, с. 273) и Д. С. Волосов (Фотографическая оптика.— М.: Искусство, 1978, с. 197). (Прим. ред.)

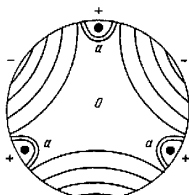
\*\*) Maksutov D. On the Temperature Coefficient, of the Focal Distance of an Object-glass.— Цирк. ГАО в Пулковск, 1936, № 20, с. 37.

\*\*\*) Danjon A., Couder A. Lunettes et télescopes, 1935, pp. 567—577.

рам (b). Ясно, что каждая из составляющих может изменяться от 0 до  $P$ , в зависимости от угла наклона  $Z$ . Наибольшая предельная деформация  $P$  достигается при  $Z = 0$ , т. е. когда диск «смотрит» в зенит; этот случай нас будет в дальнейшем больше

интересовать, так как зеркало, направленное на звезду вблизи зенита, наибольшим образом деформируется под действием собственного веса, звезды же вблизи зенита наиболее благоприятны для наблюдения ввиду уменьшения помех от атмосферной турбулентности и уменьшения светонепотерь в атмосфере.

Можно располагать задние опоры (a) любым образом и, в частности, так, как это показано черными точками на рис. 19. В этом случае каждая из опор примет на себя часть нагрузки



Вид сверху сквозь диск

Рис. 19.

$$P_a = \frac{P}{3} \cos^2 Z, \quad (57)$$

и пужно, чтобы эта величина не превзошла предела упругих деформаций вещества диска и опор при заданной площади соприкосновения опор.

Естественно, что под действием нагрузки от собственного веса, рассредоточенной указанным на рисунке способом, поверхность диска деформируется, и области (+) вблизи точек опор приподнимутся, а провисающие области (-) опустятся относительно уровня сравнительно неизменившейся центральной области диска (O). Кривые рис. 19 представляют, таким образом,



Рис. 20.

топографический рельеф деформированной поверхности диска. Диск, ограниченный поверхностью вращения (сфера, плоскость, параболоид), видоизменит при такой разгрузке на три точки свою поверхность на поверхность трехосной симметрии, а телескоп с таким зеркалом изобразит звезду не в виде круглого пятна или дифракционного кружка с кольцами, но в виде ядрышка с тремя хвостами или в виде дифракционной фигуры с тремя направлениями сгустков света в кольцах (рис. 20).

Искажение дифракционного изображения станет заметным для глаза, когда деформации (b) поверхности зеркала окажутся порядка  $\frac{1}{8} \lambda$ .

Ту же задачу можно решать и эмпирически, наблюдая качество дифракционного изображения звезды в данном зеркало при

различных значениях угла  $Z^*$ ), т. е. при деформациях, изменяющихся в широких пределах от 0 до  $\delta_{\text{max}}$ . Если зеркало достаточно тонкое и крупное, величина  $\delta$  может достигать значений, во много раз превышающих  $\frac{1}{8} \lambda$ ; наблюдатель будет иметь перед глазами большое разнообразие картины искаженного изображения и может определить такое значение угла  $Z$ , при котором практически еще не наблюдается снижения качества изображения; затем, зная  $Z$  и  $R$ , зная размеры и механические свойства зеркала и вычислив аналитически величину максимальной деформации, можно установить соответственные допуски на деформацию. Но предположим, что мы не знакомы с теорией упругости; тогда тот же опыт позволит установить необходимые закономерности, если варьировать не только значение угла  $Z$  и систему разгрузки на то или иное число опорных точек, но и размеры и материал зеркала.

Так или иначе, по удаётся установить, что деформации ( $\delta$ ) поверхности разгруженного диска (на уровне поверхности Земли, где ускорение силы тяжести  $g = \text{const}$ ) пропорциональны следующей величине:

$$\delta = K \frac{d}{E} \left( \frac{D}{l} \right)^2 D^2 \cos Z, \quad (58)$$

где  $d$  — удельный вес материала диска,  $E$  — его модуль упругости,  $D$  — диаметр,  $l$  — толщина диска и  $Z$  — угол наклона к горизонту. Коэффициент  $K$ , во-первых, зависит от принятой нами системы разгрузки (числительное количество опорных точек и как они расположены) и, во-вторых, от системы измерения остальных величин формулы.

Если величина  $\frac{d}{E}$  характеризует собой механические свойства диска, то величина  $\left( \frac{D}{l} \right)^2 D^2$  характеризует геометрическую жесткость диска; выражение же (58) в целом определяет собой обратную величину жесткости диска данных размеров, из данного материала, заданным образом разгруженного и наклоненного к горизонту на заданный угол  $Z$ . Эту величину можно назвать «гибкостью» или «прогибаемостью\*\*») диска под действием собственного веса.

Обозначив «жесткость» диска буквой  $\sigma$ , причем  $\sigma = K_1 \cdot \frac{1}{\delta}$ , дадим для нее, согласно (58), следующее выражение:

$$\sigma = C \frac{E}{d \cdot D^2} \left( \frac{l}{D} \right)^2 \sec Z, \quad (59)$$

где  $C$  — некоторый новый численный коэффициент, зависящий от принятых систем разгрузки и единиц измерения. Как видим,

\*) Этот опыт удобнее всего производить в лабораторных условиях, используя наклонную коллиматорную установку.

\*\*) Термины «гибкость» или «прогибаемость» лучше всего соответствовать термину Кудера «la flexibilité».

жесткость одного и того же зеркала может изменяться от некоторой минимальной величины (при  $Z=0$ ) до бесконечно большой (при  $Z=90^\circ$ ); нас должна интересовать минимальная жесткость,

$$\sigma_{\min} = C \frac{E}{d \cdot D^2} \left( \frac{l}{D} \right)^2, \quad (60)$$

где  $l$  и  $D$  будем выражать в миллиметрах.

Исследования Кудера позволили ему утверждать, что в случае кварцевого или стального зеркала и при разгрузке его на три точки (см. рис. 19) минимальная жесткость зеркала оказывается достаточной, чтобы заметно не испортить качество изображения, если  $\left( \frac{l}{D} \right)^2 \frac{1}{D^2} \geq 6,25 \cdot 10^{-7}$ ; после этого

$$\sigma_{\min} = C_3 \frac{E}{d} 6,25 \cdot 10^{-7},$$

где  $C_3$  — коэффициент, соответствующий случаю разгрузки на три равноудаленные точки по краям диска.

Возьмем из табл. 2 значения  $E$  и  $d$  для кварца и стали и соответственно найдем для этих двух случаев:

$$\sigma_{\min} = C_3 \cdot 1,76 \cdot 10^{-3} \text{ и } \sigma_{\min} = C_3 \cdot 1,70 \cdot 10^{-3}.$$

Поэтому примем

$$\sigma_{\min} = C_3 \cdot 1,73 \cdot 10^{-3}. \quad (61)$$

Примем  $\sigma_{\min} = 1$  в том случае, когда жесткости диска как раз достаточно, чтобы деформации зеркала не вызвали вредного искажения дифракционной картины изображения звезды; тогда, например, при  $\sigma_{\min} = n$  единиц, наше зеркало имеет  $n$ -кратный запас жесткости. Приняв  $\sigma_{\min} = 1$ , мы определяем значение коэффициента  $C_3$ :

$$C_3 \approx 580. \quad (62)$$

Зная  $C_3$  и механические константы материалов, легко составить таблицу  $\sigma_{\min}$  для различных значений  $l$  и  $D$ , пользуясь выражением (60). Составим такую таблицу для зеркал, разгруженных на три точки и изготовленных из никреса, у которого  $E = 6200$  и  $d = 2,25$  (табл. 10).

Области таблицы, не удовлетворяющие условиям достаточной жесткости, отделены жирной чертой (правая часть). Мы видим, что зеркало  $D=1000$  мм, даже при толщине 200 мм (т. е. при  $l:D=1:5$ ), имеет 16-кратный недостаток жесткости; зеркало  $D=500$  мм обладает достаточной на пределе жесткостью только при  $l=200$  мм (т. е. при  $l:D=1:2,5$ ); в то же время малые зеркала даже при относительно малых толщинах обладают избыточной жесткостью: например, у зеркала  $D=100$  при  $l=10$  запас жесткости более чем полуторный; если же ему придать относительно толщину 1:2, то запас жесткости окажется 40-кратным.

Аналогично предыдущей таблице, можно составить таблицу, выражающую минимальную толщину  $l_{\min}$  и относительную толщину  $(l:D)_{\min}$  для различных диаметров  $D$  зеркала из пирекса,

Т а б л и ц а 10  
[ $\sigma_{\min}$  при разгрузке на 3 точки]

| $\frac{D}{l}$ | 100 | 200 | 500   | 1000  |
|---------------|-----|-----|-------|-------|
| 200           | 640 | 40  | 1,0   | 0,064 |
| 100           | 160 | 10  | 0,26  | 0,016 |
| 50            | 40  | 2,5 | 0,064 | 0,004 |
| 20            | 6,4 | 0,4 | 0,010 |       |
| 10            | 1,6 | 0,1 | 0,003 |       |

разгруженного на три точки (табл. 11); для этого только следует приравнять единице выражение (60), в котором  $C = C_0 \approx 580$ :

$$l_{\min} \approx \frac{D^2}{1250}. \quad (63)$$

Мы видим, что при  $D = 1$  мм достаточная жесткость обеспечивается при толщине менее микрометра и при относительной толщине менее  $\frac{1}{1000}$ ; при зеркале  $D = 100$  мм необходима толщина 8 мм и относительная толщина 1:12,5; уже для зеркала

Т а б л и ц а 11  
[Разгрузка на 3 точки]

| $D$                               | 1      | 10    | 100    | 140   | 200   | 250 | 350   | 500   | 700   | 1000   |
|-----------------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|--------|
| $l_{\min}$                        | 0,0008 | 0,08  | 8      | 16    | 32    | 50  | 98    | 200   | 390   | 800    |
| $\left(\frac{l}{D}\right)_{\min}$ | 1:1250 | 1:125 | 1:12,5 | 1:8,8 | 1:6,3 | 1:5 | 1:3,6 | 1:2,5 | 1:1,8 | 1:1,25 |

$D = 200$  мм рекомендуемая многими дилетантами относительная толщина 1:8 оказывается недостаточной для разгрузки зеркала на три точки; наконец, для 1-метрового зеркала потребовалась бы чудовищная толщина 0,8 м, если бы мы захотели разгрузить это зеркало на 3 точки.

Согласно Кудеру, разгрузка зеркала на шесть равноотстоящих точек, расположенных на внешней зоне зеркала, оказывается в 9 раз более выгодной. Иными словами, коэффициент  $C_0$  (индекс «6» характеризует число точек разгрузки при установленном нами их расположении) оказывается в 9 раз больше

коэффициента  $C_3$ , т. е. согласно (62),

$$C_3 \approx 5200. \quad (64)$$

Выражение (60), приведенное единице, позволяет составить табл. 12, аналогичную табл. 11, но для случая разгрузки на 6

Таблица 12

[Разгрузка на 6 точек]

| $D$ , мм                          | 100    | 140    | 200    | 250    | 350      | 500     | 700     | 1000    |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|---------|---------|
| $l_{\min}$ , мм                   | 2,64   | 5,2    | 10,6   | 16,5   | 32,5     | 66      | 130     | 264     |
| $\left(\frac{l}{D}\right)_{\min}$ | 1 : 38 | 1 : 27 | 1 : 19 | 1 : 15 | 1 : 10,7 | 1 : 7,6 | 1 : 5,4 | 1 : 3,8 |

периферических равноотстоящих точек ( $C = C_6$ ). Формула для вычисления следующая:

$$l_{\min} = \frac{D^2}{3780}.$$

Мы видим, что даже зеркало (из пирекса) диаметра  $D = 500$  мм при разгрузке на 6 точек может иметь относительную толщину, очень близкую к той, которая, неизвестно почему, рекомендуется дилетантами. Зеркала же меньших диаметров требуют в этом случае совсем малых относительных толщин.

При увеличении числа опорных точек разгрузка становится более выгодной, местные деформации данного зеркала уменьшаются, а потому можно уменьшать толщину или увеличивать диаметр зеркала, не переходя предела допустимых деформаций. Предполагается, конечно, что каждая точка опоры воспринимает соответственную долю веса зеркала, а о том, как это осуществляется, будет сказано ниже.

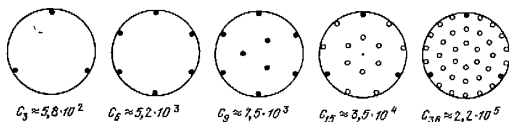


Рис. 21.

Изобразим на рис. 21 различные системы разгрузки и соответственно дадим значения коэффициентов  $C_n$ , где  $n$  — число точек опоры, изображенных на рисунке \*).

\*) Экспериментальная проверка «коэффициентов Дайсона»  $C_n$  была выполнена Е. Г. Гроссвальд-Хабло (Изв. ГАО АН СССР, 1967, № 182, с. 269). (Ирим. ред.)

Первые два случая нам уже известны. По мере роста  $n$  конструкция разгрузочного приспособления все осложняется и осложняется и в то же время появляется возможность хорошо разгружать все более и более «гибкие» зеркала, т. е. зеркала с растущим диаметром или уменьшающейся относительной толщиной. Но третий случай, — разгрузка на 9 точек, — не представляет особых трудностей осуществления и часто используется для разгрузки достаточно крупных оптических деталей. Поэтому составим и приведем здесь для него табл. 13, аналогичную двум предыдущим таблицам.

Таблица 13  
[Разгрузка на 9 точек]

| $D$ , мм        | 250  | 350  | 500   | 700   | 1000  |
|-----------------|------|------|-------|-------|-------|
| $l_{\min}$ , мм | 14   | 27   | 55    | 108   | 220   |
| $(l:D)_{\min}$  | 1:16 | 1:13 | 1:9,1 | 1:6,5 | 1:4,5 |

Как видим, этот способ разгрузки практически пригоден для зеркал с диаметром более  $1/2$  м, но даже при  $D=1$  м толщина зеркала, хотя и очень большая (220 мм), все же не относится к разряду непомерно больших и лишенных практического смысла.

Приведенные зависимости в такой же мере справедливы для ириксевых или кварцевых зеркал, как и для зеркал стальных, так как отношение  $E:d$ , входящее в выражение (60), для этих веществ практически одинаковое. Нужно только помнить, что стальные зеркала окажутся при этом в 3—3,5 раза тяжелее стеклянных \*).

Применение сотовой конструкции позволяет еще шире раздвинуть рамки применения каждого из способов разгрузки.

Оптическое изделие, положенное на стол шлифовальной или полировальной машины, не только подвергается деформациям прогиба от собственного веса (при этом всегда  $Z=0$ ), но и деформациям от сосредоточенных и переменных по величине и расположению нагрузок обрабатывающего инструмента (резца, камня, шлифовальника, полировальника). Так как сумма обоих из двух слагаемых, то разгрузочные приспособления на столах шлифовальных машин должны удовлетворять требованиям более строгим, чем рассмотренные выше. Иными словами, в этом случае для коэффициента  $C_n$  следует брать значения меньше указанных на рис. 21, например, уменьшенные вдвое.

\*) Существенным отличием обладают зеркала из бериллия, у которых  $E:d = 10,2 \cdot 10^9/\text{см}$ . (Прим. ред.)



Мы пока говорили преимущественно о разгрузке зеркал, зная, как пагубно влияют на качество изображения малейшие деформации их поверхности. Переходя от зеркал к линзам, мы обнаруживаем, что линзы могут в значительной степени деформироваться в оправках под действием собственного веса, не снижая заметным образом качества изображения. Действительно, если рис. 19 изображает прогнувшуюся линзу, то насколько опустились точки (—) на передней поверхности, настолько же (в первом приближении) они опустятся и на задней поверхности; в результате разность хода лучей при прохождении их через этот участок линзы практически останется неизменной, будет ли линза деформирована или нет. Только при весьма значительных деформациях линзы могут появиться незначительные разности хода на деформированных участках, а потому, хотя и должен существовать допуск на деформации линз в оправках под действием собственного веса, но он совершенно другого порядка, чем тот же допуск для зеркал.

Не приходится объяснять, что мы сейчас предполагали линзы с правильно изготовленными точными геометрическими поверхностями, исследованными в условиях отсутствия прогибов линзы (например, линза, плавающая в тяжелой жидкости).

Иные требования следует предъявлять к разгрузке линзы во время ее обработки на станке. Если из-за плохой разгрузки (или неудовлетворительной паклейки) линза деформируется, то мы будем обрабатывать ее в натяженном состоянии, придадим строгую геометрическую форму ее поверхности, а затем, сняв со станка (или отклеив), освободим или перераспределим временные натяжения, и линза изменит свою форму. Обработка второй поверхности линзы не спасает положения, а усугубляет его. Поэтому допуск на деформации линз от внешних усилий или под действием собственного веса во время их обработки будет того же порядка, что и допуск для зеркал.

Теперь рассмотрим различные конструктивные решения разгрузки и устройство разгрузочных приспособлений.

Известно, что поверхность любой формы может быть уложена на трех точках. Добавление к трем точкам четвертой точки опоры либо оказывается бесполезным, если эта точка расположилась ниже поверхности, либо вредным, если она расположилась выше поверхности, а потому приподняла ее, переместив в новое положение и выключив одну из трех ранее действовавших точек опоры, ориентированных наиболее рациональным образом. Установить же с оптической точностью четвертую жесткую точку опоры точно на уровень разгружаемой поверхности слишком трудно на практике.

Но если бы мы и добились такой установки четвертой точки, то изменении наклона инструмента и возникающие при этом изменения формы всей совокупности (оправы и изделия) рано или поздно нарушили бы ожидаемые условия разгрузки. К этому следует добавить, что старение металла оправы обуславливает

появление последующих деформаций, часто значительно превышающих оптические допуски.

Можно положить оптическую деталь на кольцо или на обратную форму, но если эти последние, при высокой их жесткости, не выполнены с оптической точностью, то оптическая деталь будет разгружена на число точек более трех только за счет ее деформации. Вот почему разгрузка на три жесткие точки имеет такое большое значение в оптике.

Схема оправы с разгрузкой на три точки изображена на рис. 22. Изделие *A* лежит на трех точках *a*, жестко связанных с оправой *B*. Для боковой разгрузки между оправой и изделием находятся три разгрузочные точки *b*, жестко связанные с оправой. При вертикальном положении изделия две нижние точки *b* воспринимают вес изделия *P*; при других наклонах к горизонту они воспринимают составляющую  $P \cdot \sin Z$ . При перемещениях оправы с изделием в параллактической монтировке бывают положения, при которых только одна из точек *b* воспринимает нагрузку, другие же две выключены из работы.

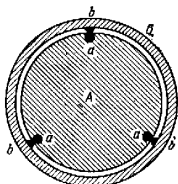


Рис. 22.

Между разгрузочными точками *b* и изделием *A* следует оставлять «температурный зазор», рассчитываемый для наиболее низкой температуры эксплуатации инструмента (материал оправы, как правило, имеет больший коэффициент расширения, чем стекло). Если  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты расширения изделия и оправы, если *D* — диаметр изделия и если  $t_1$  — крайняя низкая температура, а  $t_2$  — температура, при которой производится исследование зазора, то величина температурного зазора  $\Delta_t$  (по диаметру) равна

$$\Delta_t = D(\alpha_2 - \alpha_1)(t_2 - t_1). \quad (65)$$

Составим таблицу  $\Delta_t$  для различных диаметров *D*, для  $t_1 = -30^\circ\text{C}$  и  $t_2 = +20^\circ\text{C}$  и для двух случаев сочетания оправы с

Таблица 14  
[ $t_1 = -30^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = +20^\circ\text{C}$ ]

| <i>D</i> , мм      | 100 | 250 | 500 | 1000 |
|--------------------|-----|-----|-----|------|
| а) пирекс-алюминий | 100 | 250 | 500 | 1000 |
| б) крон-сталь      | 15  | 38  | 75  | 150  |

изделием: а) зеркало из пирекса ( $\alpha_1 = 3 \cdot 10^{-6}$ ) в алюминиевой оправе ( $\alpha_2 = 23 \cdot 10^{-6}$ ) и б) линза из кроны ( $\alpha_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ ) в стальной оправе ( $\alpha_2 = 11 \cdot 10^{-6}$ ) (табл. 14; величины зазоров даны в мкм).

Часто недостаточно грамотный конструктор, желая облегчить вес конструкции, предлагает алюминиевые корпуса и оправы для сравнительно крупной оптики, не учитывая, что при этом температурные зазоры должны быть очень большими, а изделие не будет занимать достаточно стабильного положения в гнезде оправы. Сочетание шпекса с алюминием, представленное в таблице, достаточно наглядно убеждает нас в этом.

К температурному зазору следует еще добавить так называемый технологический зазор, являющийся результатом того, что

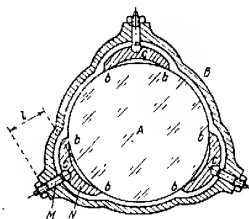


Рис. 23.

всякий заданный размер мы выполняем не абсолютно точно, но с некоторыми ошибками, укладываемыми в пределах некоторых допусков, обусловленных точностью примененной технологии (станки, измерительный инструмент и т. д.), квалификацией мастеров и экономическими соображениями. Этот технологический допуск на зазор следует всегда задавать, как говорят, «в сторону плюса», т. е. добавлять его к температурному зазору. В лучшем случае — зазор окажется равен

температурному, в худшем случае — он увеличится на технологический «припуск».

Но если бы истинный зазор был меньше температурного, то при некоторой достаточно низкой температуре, не выходящей, однако, за пределы эксплуатационной границы, изделие оказалось бы зажатым своей оправой, а дальше начало бы катастрофически деформироваться под действием огромных сжимающих усилий. Уж лучше пусть зеркало или линза свободно смещаются в своих гнездах, чем окажутся деформированными: в последнем случае следует опасаться катастрофы не только для качества изображения, но, иногда, и для самого хрупкого стеклянного изделия.

Понутно опишу здесь принципиальную схему компенсационной оправы, примененной мною для пулковского объектива  $D = 820$  мм. Каждая из линз разгружена на 6 точек  $a$  и 6 точек  $b$ , попарно с помощью коромысел, сведенных к трем точкам. На рис. 23 изображена только система разгрузки на точки  $b$ .

Оправа  $B$  может быть отлита из стали (или даже из чугуна) и имеет три равноудаленных прилива; с концами приливов скреплены стержни  $M$ , имеющие возможность свободно скользить в цилиндрических гнездах приливов при тепловом расширении; расстояние между точкой крепления стержней  $M$  и линзой равно  $l$ . Коромысла  $N$  сочленяются на шарнирах ( $c$ ) со стержнями  $M$  и заканчиваются опорными площадками  $b$ , обжимающими линзу  $A$  в шести точках. Детали  $M + N$  выполнены из бронзы, дю-

ралюминия или, вообще, из металла с высоким коэффициентом расширения. Зная коэффициенты расширения:  $\alpha_1$  — для линзы,  $\alpha_2$  — для оправы  $B$ ,  $\alpha_3$  — для разгрузочного устройства  $M + N$ , определяем условие температурной компенсации в виде:

$$\frac{l}{D} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2(\alpha_3 - \alpha_2)}. \quad (66)$$

В этом случае, даже при значительных изменениях температуры, опоры ( $b$ ) будут находиться практически на одинаковом расстоянии от обода линзы. Обратив это расстояние в нуль, т. е. приведя с помощью винтового устройства точки  $b$  в соприкосновение с линзой, мы скажем, что в оправе данной конструкции не только температурный зазор, но и зазор технологический близки к нулю. Если принять для крона  $\alpha_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ , для стали  $\alpha_2 = 11 \cdot 10^{-6}$  и для алюминия  $\alpha_3 = 23 \cdot 10^{-6}$ , то при полном диаметре линзы  $D = 840$  мм пойдем по выражению (66), что  $l = 105$  мм, т. е. что три прилива у оправы не слишком сильно увеличивают ее размеры, а компенсационная система не слишком увеличивает вес. Преимущества же такой оправы перед обыкновенной огромны: 1) линза всегда однообразно зажата с желательной для нас силой; 2) линза не смещается в гнезде при перемещениях рефрактора; 3) она разгружена по ободу в худшем случае на две точки и в лучшем случае на четыре; 4) оправу не нужно точно обрабатывать, протачивая гнездо под диаметр линзы, так как между оправой и линзой можно оставить значительный промежуток, прикрытый резиновым кольцом.

Но возвратимся к более мелкой оптике и к системе разгрузки на три точки (рис. 22).

Точки  $a$  и  $b$  следует располагать возможно ближе одну к другой, относя первые почти к самому краю зеркала и устанавливая вторые по тем же азимутам и приблизительно против середины толщины зеркала. В противном случае, при изменениях наклона зеркала и его смещениях возникающие заметные силы трения на опорных точках будут вызывать дополнительные нежелательные деформации поверхности.

В простейшем случае (мелкая и средняя оптика) можно вообще отказаться от боковой разгрузки на точки  $b$ , делать оправу с цилиндрическим гнездом с соответствующим зазором и допустить, что линза или зеркало будут как угодно перекашиваться в пределах зазора, опираясь на одну точку — на точку касания двух окружностей; при этом из-за трения между изделием и точками  $a$  точка касания  $b$  не всегда будет располагаться под центром тяжести изделия. Такое незакономерное и значительное перекачивание линз объектива в гнездах оправы хорошо наблюдалось и часто являлось значительной помехой в работе у большого 30-дюймового пулковского объектива; его оптический центр, а вместе с ним и изображение звезды в фокальной плоскости, совершали во время длительных экспозиций произвольные скач-

кообразные и непредвиденные смещения в пределах кружка с диаметром около 1 мм.

Этот эффект неприятен и для астрографических и для спектрографических работ. В первом случае он ведет к размазыванию изображения за время между моментом смещения одной из линз и моментом, когда наблюдатель обнаружил это смещение изображения \*) и выправил его; во втором случае в течение того же времени изображение звезды окажется смещенным со

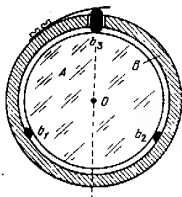


Рис. 24.

щели спектрографа, а спектрограф в это время либо ничего не регистрировал, либо регистрировал спектр какой-то другой звезды, случайно попавшей на щель.

Такое смещение линз в оправках особенно вредно в астрометрических инструментах: здесь приходится говорить уже не о помехах, а о прямом искажении результатов измерения \*\*).

Для астрометрических объективов следует рекомендовать компенсационную оправу. Но если астрометрический инструмент предназначен для измерения углов только в одной плоскости или только относительно одной плоскости (например, пассажный инструмент), то задачу монтажа объектива можно решить проще, и на рис. 24 приведена схема такого решения. Оправа  $B$  имеет две жесткие разгрузочные точки  $b_1$  и  $b_2$ ; третья разгрузочная точка  $b_3$  устроена в виде пружины и всегда обращает зазор в нуль; сила пружины должна быть больше веса линзы  $A$ , так как при «перекладывании» инструмента или при переходе его через зенит точка  $b_3$  может оказаться внизу и примет на себя составляющую веса линзы  $P \sin Z$ . При таком устройстве оптический центр  $O$ , а вместе с ним и оптическая ось и изображение, могут совершать перемещения при изменениях температуры только в плоскости  $b_3O$  и ни в какой другой, что для данного инструмента может оказаться допустимым. Так как вес линз объективов астрометрических инструментов измеряется килограммами, то и сжатие линзы пружинным устройством  $b_3$  будет измеряться величинами того же порядка, и ничего особенно вредного при этом не произойдет.

Разгрузка изделий на число точек более трех осуществляется двумя принципиально различными способами: а) по системе Т. Грёмба и б) по системе В. Лассела. Обе системы разгрузки предложены и осуществлены в прошлом веке.

\*) В этом случае «гидирование» инструмента должно производиться с помощью так называемой кассеты Коммона или Ричи.

\*\*) Для астрометрических инструментов Л. А. Сухарева разработал самоцентрирующуюся оправу (в изд.: Успехи астрономических наук/Отв. ред. акад. В. Г. Фесенков.— М.: Изд-во АН СССР, 1954, т. 6, с. 161). (Прим. ред.)

а) Система Грёбба (рис. 25). На оправе зеркала имеются три жестких опорных выступа  $c$ , на которые наложены соответственно три треугольника, качающиеся на шаровых шарнирах выступов  $c$ ; точки  $c$  находятся в центре тяжести (или достаточно близко от него) треугольников  $aaa$ , оказывающихся в этом случае в состоянии безразличного равновесия (или близко к нему).

Вершины  $a$  треугольников являются опорными нагруженными точками, рационально распределенными по поверхности лежащего на них зеркала  $A$ .

Нагрузка от веса зеркала распределяется таким образом (равномерно или в желательном соотношении) между девятью точками  $a$ , которые передают ее затем трем жестким опорам  $c$ . Нетрудно видеть, что на каких бы уровнях ни лежали предварительно точки  $a$  — после наложения зеркала все они выравниваются по тыльной поверхности зеркала и встанут в положение, когда каждая из точек примет на себя ту порцию нагрузки, которую конструктор ей предопределил. При таком выравнивании треугольников и их опорных точек будет иметь место трение между тыльной поверхностью зеркала и точками  $a$ ; кроме того, как мы помним, проявятся силы трения из-за того, что точка  $b$  и  $c$  несколько раздвинуты. Так как силы трения приводят к некоторым дополнительным деформациям зеркала, то с ними следует бороться, и такая задача до известной степени может быть разрешена конструктором.

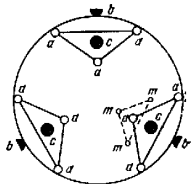


Рис. 25.

Никто не мешает лам над каждой из 9 точек  $a$  расположить на шарнире новые малые треугольнички с опорными точками  $m$ , как это показано пунктиром на рис. 25, и осуществить таким образом «двухэтажную» систему Грёбба разгрузки на 27 точек ( $3 \times 3 \times 3 = 27$ ). Действуя таким же образом дальше, получим «трехэтажную» систему разгрузки на 81 точку ( $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ ). Последняя система разгрузки была применена лордом Россом для его гигантского телескопа с очень «гибким» бронзовым зеркалом  $D = 1820$  мм (1845 г.).

Понятно, что «одноэтажная» система с 9 точками разгрузки имеет наибольший практический интерес; остальные системы и слишком сложны, и слишком громоздки, и, главное, не вполне обеспечивают надлежащую стабильность зеркала, благодаря большому числу сочленений.

В некоторых разгрузочных приспособлениях я сочетал метод Грёбба с методом коромысла, как это делал еще Грёбб, например, в оправе большого мельбурнского рефлектора.

На рис. 26 пояснен метод коромысла в чистом виде. Коромысла качаются вокруг осей  $c$  —  $c$  и несут на своих концах опорные точки (или поверхности)  $a$ . Таким образом вес зеркала

разгружен на шесть точек и передан трем жестким точкам оправы. Сочетание метода Грёбба с методом коромысла (назовем его расширенным методом Грёбба) позволяет оперировать с двумя множителями 2 и 3 и получать большое разнообразие систем разгрузки и числа точек разгрузки; так, можно разгрузить зеркало на 6 и на 9 точек («одноэтажная» разгрузка), на 12, на 18 и на 27 точек («двухэтажная» разгрузка) и т. д.

Опишу принципиальную схему разгрузочного приспособления нашей старой большой шлифовальной машины (рис. 27).

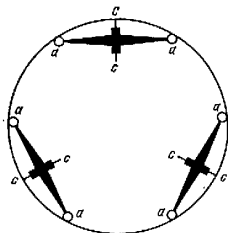


Рис. 26.

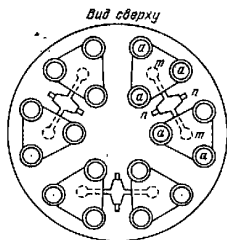


Рис. 27.

Изделие с диаметром до 1 м — выпуклое, вогнутое или плоское — укладывается на 18 тарелок  $a$ ; на каждую тарелку наклеено кожаное или сукожное кольцо, на которое и опирается обрабатываемое изделие. Тарелки качаются на шаровых головках в вершинах треугольников; треугольники таким же образом качаются на шаровых головках  $m$  в концах коромысел, а эти последние качаются вокруг жестких осей  $n - n$ .

Если бы вместо тарелок треугольники лежали на своих вершинах жесткие опорные площадки, то это была бы «двухэтажная» разгрузочная система с 18 точками; в действительности же это «трехэтажная» система с 18 тарелками. Так как «тарелка» осуществляет разгрузку значительно выгоднее «точки», то у такой системы разгрузки коэффициент  $C_{18}$ , по-видимому, не менее  $\sim 8 \cdot 10^4$ .

На этой машине шлифовались линзы для пулковского объектива  $D = 820$  мм (полный диаметр  $D_1 = 840$  мм). У обеих линз приблизительно одинаковая собственная жесткость: флинтсовая линза несколько толще кроповой, но у нее зато и больший удельный вес и меньшее значение  $E$ . Хотя линзы имеют кривизны и не равноценны рассмотренным выше плоскопараллельным дискам, но для грубого подсчета можно кроповую, например, линзу данного объектива отождествить с кроповым диском некоторой толщины  $l$ , большей толщины линзы на краю и меньшей тол-

щины линзы в центре. С достаточным правдоподобием зададим для нее следующие расчетные условия:

$$C_{18}^0 \approx 8 \cdot 10^4, \quad E \approx 7000, \quad d = 2,53, \quad l \approx 70, \quad D = 840, \quad (67)$$

после чего найдем из выражения (60):

$$\sigma_{min} \approx 2,2, \quad (68)$$

т. е. при обработке линзы на машине с нашим разгрузочным приспособлением имеется более чем двойной запас жесткости, и этого, по-видимому, достаточно, чтобы не бояться вредных деформаций от действия собственного веса линзы вместе с внешними усилиями при обработке. Как уже было сказано, деформации линз в оправе под действием собственного веса могут без ущерба для качества изображения достигать значительных величин, а потому у данного объектива разгрузка линз в оправе в осевом направлении осуществляется, и притом с некоторой перестраховкой, всего на 6 точек по системе коромысел с температурной компенсацией.

б) Система Лассела (рис. 28). Во всех случаях изделие накладывается на три опорные точки  $a$ , жестко связанные с оправой (или разгрузочным столом). Опоры  $a$  вместе с боковыми опорами  $b$  обеспечивают неизменность положения зеркала. Но трех разгрузочных точек мало для крупного изделия, и мы присоединяем к ним четвертую точку  $m$ , пятую, шестую и т. д., располагая их по такому закону и в таком количестве, какие сочтем рациональными для каждой конкретной задачи.

На опорную пятку  $m$  давит точка  $p$  правого плеча рычага  $qr$ , качающегося вокруг оси  $O-O$  и несущего на левом плече (переменной длины) груз  $q$ . Точка  $p$  приложения усилий, центр тяжести подвижных частей рычага и ось качения  $O-O$  должны, рассуждая строго, лежать в одной плоскости, параллельной задней поверхности зеркала; впрочем, небольшие отступления от этого правила не могут сильно парусить благоприятные свойства такой «астати́ческой» системы. Перемещая груз  $q$  вдоль левого плеча рычага, мы можем создать в точке  $m$  желательное нам давление, а делая тщательно эту операцию для всех остальных точек  $m$ , на рисунке не показанных, мы можем распределить груз зеркала между всеми точками  $m$  и тремя точками  $a$  в желательном для нас соотношении и, в частности,

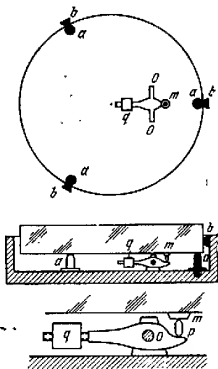


Рис. 28.



поворну. При изменении наклона зеркала и оправы изменяется и давление груза на рычаг (а в конечном счете на точку  $m$ ), причем по тому же закону:

$$q_z = q \cos Z, \quad (69)$$

по которому изменяется составляющая веса зеркала, подлежащая разгрузке. Поэтому достигнутая однажды правильная разгрузка сохраняется при любых поворотах и наклонах инструмента, пока он направлен выше горизонта. При инструменте, наклоненном ниже горизонта (что лишено смысла для астрономических наблюдений), разгрузочное приспособление, очевидно, выходит из строя, как не обладающее «присасывающим» действием.

Произведем сравнение описанных выше двух видов разгрузки.

Система разгрузки Грёбба подкупает простотой и ясностью механической идеи конструкции. Правильно рассчитанная, изготовленная и снабженная ограничителями от проворачивания треугольников, она осуществляет надлежащую разгрузку зеркала однообразно, без участия экспериментатора и помимо его воли. В этом большое ее преимущество, но в этом же и ее недостаток, так как в реальных зеркалах иногда бывает желательно частично компенсировать местные ошибки их поверхностей, отступая от условия равномерной разгрузки на каждую из опорных точек; но этого в системе Грёбба выполнить нельзя. Конструктивно простой и надежной в эксплуатации оказывается «одноэтажная» система с разгрузкой на 9 точек (или на 6 точек с помощью трех коромысел). Но и в такой системе точки приложения сил, разгружаемых в направлении оси зеркала, отступают заметным образом от опорных точек  $b$ , в которых разгружаются радиальные силы; поэтому возникающие силы трения могут вызвать дополнительное коробление поверхности зеркала.

От всех этих недостатков свободна система разгрузки Ласселя. В ней можно жесткие точки опоры  $a$  расположить в непосредственной близости от точек  $b$  \*). В системе Ласселя можно брать любое желательное нам число точек опоры, а не обязательно число, кратное двум или трем; при этом система оказывается всегда «одноэтажной» (если не считать вторым этажом сочленение (рис. 28), передающее давление от рычага к точке  $m$ ). Система Ласселя допускает вмешательство экспериментатора в разгрузку зеркала. Это и хорошо и плохо одновременно: хорошо — потому, что позволяет исправить не только некоторые местные ошибки, но и общие ошибки формы поверхности зеркала; плохо — потому, что требует кропотливой и искусной работы эк-

\*) В крупных зеркалах опорные точки, разгружающие зеркало в осевом и в радиальном направлениях, совмещаются. Более того, для радиальной (боковой) разгрузки в тело зеркала с задней стороны высверливаются глухие отверстия с тем, чтобы эти механизмы поддерживали зеркало в плоскости центра тяжести. (Прим. ред.)

спериментатора \*) и не застраховано от возможной разъюстировки в будущем. Кроме того, соответственное перераспределение нагрузок на разгрузочные точки способно компенсировать ошибки формы поверхности зеркала только для некоторого определенного значения угла наклона (например, для  $z = 45^\circ$ ); для других же углов  $z$  будет иметь место либо недоисправление, либо переисправление ошибок зеркала. Наконец, система Лассела конструктивно сложнее и тяжелее одноэтажной системы Грэмба.

В заключение настоящей главы остается несколько расширить затронутый ранее (гл. II) вопрос о рациональном выборе материала для зеркала.

Для уменьшения температурных деформаций зеркала желательно повышать коэффициент  $\psi$  (18). Этот коэффициент на основании выражения (17) представим в виде

$$\psi = \left( \frac{E}{d} \right) \frac{\lambda}{\alpha C}. \quad (70)$$

Для уменьшения деформаций гнупия зеркала от собственного веса желательно повышать жесткость  $\sigma$  (60), которую перепишем для наглядности в виде:

$$\sigma_{\min} = \left( \frac{E}{d} \right) C_n \frac{l^2}{D^4}. \quad (71)$$

Таким образом, (70 и 71) выгодно увеличивать отношение  $\left( \frac{E}{d} \right)$ , т. е. выбирать материал наиболее упругий и наиболее легкий, если отвлечься от остальных свойств материала.

Для конструктора, да и для астронома, не безразличен вес зеркала, влияющий и на вес оправы, и на вес всего инструмента, и на расположение центра тяжести инструмента. Поэтому к двум первым условиям иногда можно присоединить еще и третье условие — уменьшение веса зеркала. Задачу сформулируем следующим образом.

Требуется оценить материалы для зеркал при условии, что  $D$  — диаметр зеркала задан,  $C_n$  — способ разгрузки задан,  $\sigma_{\min}$  — жесткость зеркала задана, вес же  $P$  зеркала изменяется в зависимости от свойств материала.

Так как вес диска равен

$$P = \frac{\pi}{4} D^2 l d, \quad (72)$$

---

\*) Установив зеркало на разгрузочное приспособление и направив телескоп на звезду с небольшим зенитным расстоянием, наблюдаем в сильный окуляр внефокальное изображение звезды или с помощью ножа Фуко теневую картину зеркала. Дефекты разгрузки при этом легко обнаруживаются. Перемещая грузики  $q$  на соответствующих разгрузочных рычагах до тех пор, пока не получим равномерно освещенного внефокального кружка или плоского рельефа теневой картины.

и так как толщина  $l$  из выражения (71) равна

$$l = D^2 \sqrt{\frac{d\sigma_{\min}}{EC_n}}, \quad (73)$$

то

$$P = \left[ \frac{\pi D^4 \sqrt{\sigma_{\min}}}{4 \sqrt{C_n}} \right] \sqrt{\frac{d^3}{E}}, \quad (74)$$

где выражение, заключенное в квадратные скобки, состоит по нашему условию из постоянных величин.

Поэтому относительный вес зеркала заданного диаметра и заданной жесткости можно характеризовать некоторым коэффициентом  $\omega$ :

$$\omega = \sqrt{\frac{d^3}{E}}. \quad (75)$$

Используя значения  $d$  и  $E$  табл. 2, составляем таблицу значений коэффициента  $\omega$  \*) (табл. 15).

Таблица 15

| Материал | $\omega$ | $h\omega=1$ для<br>пирекса | Материал        | $\omega$ | $h\omega=1$ для<br>пирекса |
|----------|----------|----------------------------|-----------------|----------|----------------------------|
| Медь     | 0,256    | 6,0                        | Плавленый кварц | 0,0415   | 0,97                       |
| Серебро  | 0,407    | 9,5                        | Пирекс          | 0,0428   | 1,00                       |
| Инвар    | 0,188    | 4,4                        | Крон            | 0,0457   | 1,07                       |
| Алюминий | 0,0513   | 1,2                        | Тяжелый флинт   | 0,131    | 3,1                        |
| Сталь    | 0,148    | 3,4                        |                 |          |                            |

С данной новой точки зрения наимыгоднейшими материалами для зеркал являются кварц, пирекс и крон; почти столь же хорошим оказывается алюминий; тяжелый флинт и сталь увеличивают вес зеркала более чем в 3 раза; наконец, серебряное зеркало оказалось бы почти в 10 раз тяжелее зеркала пирексового при одинаковой с ним жесткости.

Так как табл. 15 не может рассматриваться оторвано от табл. 2, то мы находим в ней дополнительное подтверждение рациональности алюминиевых, кварцевых и стальных зеркал. А так как алюминиевые сплавы трудно полируются, а плавленый кварц труден в изготовлении и дорог, то стальные зеркала представляются наиболее интересными и перспективными. В случае стальных зеркал очень удачно и просто разрешается вопрос о температурных зазорах и о температурных смещениях фокуса: выполняя оправы для зеркал и трубы телескопов также из стали, т. е. соблюдая равенство коэффициентов расширения всех элементов телескопа, мы освобождаемся и от температурных зазоров.

\*) Для бериллия  $\omega$  по отношению к пирексу «316» составляет 0,30. (Прим. ред.)

и от температурных расфокусировок. Наконец, применение сотовой конструкции позволяет снизить вес зеркала по крайней мере в 3 раза. На это можно возразить, что и при других материалах можно применить сотовую конструкцию и дополнительно выиграть в весе. Это совершенно правильно, но в алюминиевых сотовых зеркалах мы получим меньший относительный выигрыш в весе, так как механические свойства алюминия и его сплавов не допустят столь же тонкого и ажурного строения сотовой фермы, как в стальных сотовых зеркалах; сотовая же конструкция кварцевых зеркал явится дополнительным усложнением и без того сложного процесса их изготовления \*).

---

\*) В настоящее время освоен метод получения облегченных кварцевых зеркал путем сварки ребристой структуры из отдельных пластин и прикрепления к ней лицевой и задней плит. (Прим. ред.)

## ШЛИФОВКА И ПОЛИРОВКА

Для зеркала, линзы объектива или призмы оптик получает с завода оптического стекла стеклянную заготовку, которая по внешней форме может не походить на форму будущего изделия. Часто эту заготовку приходится распиливать, отделяя от нее лишние объемы стекла, и почти всегда необходимо снять с ее поверхностей довольно толстые слои стекла, чтобы придать изделию необходимую геометрическую форму, достаточно еще грубую на данной стадии обработки. Таким образом в процессе придания грубой формы мы можем выполнять операции распиловки, сверления, кругления и обдирки заготовки \*).

После этого выполняется, строго говоря, оптическая обработка изделия, т. е. придание ему точной формы. Этот процесс начинается с операции грубой шлифовки, при которой поверхностям придается желательная кривизна (пока с малой точностью), а изделию придается заданная толщина и диаметр с технологическим «припуском» на последующую обработку. Иногда на этой стадии, иногда на следующей, а иногда на самой последней — изделие центрируется, т. е. круглится так, чтобы оптическая ось линзы совпала с осью цилиндрического обода линзы.

Переходя от крупных номеров шлифующих порошков (абразивов) к все более и более мелким, мы постепенно переходим от грубой шлифовки к тонкой шлифовке, и трудно установить границу, где кончается грубая шлифовка и где начинается шлифовка тонкая. По мере перехода от крупнозернистых к мелкозернистым абразивам возрастают тщательность и точность обработки: допуски на кривизны поверхностей делаются все более строгими, припуски на толщину все уменьшаются, внимание оптика привлечено не только к выполнению заданной стрелки кривизны у изделия, но и к тому, чтобы его поверхность имела точную сферическую форму. По мере исчерпания припусков и приближения к концу тонкой шлифовки мастер все чаще и чаще прибегает к помощи контрольно-измерительных приборов, боясь перешлифовать изделие и уйти за пределы нижнего допуска на толщину изделия. Это и понятно, так как во власти мастера снять с изделия слой стекла любой толщины, но не в его власти нарастить

\*) Распиловка выполняется дисковыми фрезами, изготовленными из мягкого металла, набитого алмазной крошкой; сверление — трубчатыми сверлами; грубая обдирка — фрезерованием или грубыми абразивными порошками; см. с. 125—131. (Прим. ред.)

слой стекла хотя бы микронной толщины; во многих же линзах допуск на толщину оказывается очень малым.

Операции по приданию изделию грубой и точной формы одинаково относятся к процессу *шлифовки* в широком смысле слова и заметно отличаются от процесса *полировки* стекла, как это мы увидим ниже.

Шлифованная поверхность всегда имеет матовый вид. Даже после наиболее тонких шлифующих порошков поверхность с законченной тонкой шлифовкой остается матовой, хотя она и способна на незначительное пропускание света в проходящих лучах и на частичное отражение света для падающих лучей.

Полировка должна сгладить все микроскопические неровности тонкоотшлифованной поверхности и сделать их, во всяком случае, меньше  $\frac{1}{8} \lambda$  для одиночного зеркала. В действительности полировка справляется с этой задачей еще лучше; в этом мы убеждаемся, получая хорошие оптические изображения в системах с большим количеством зеркал и для лучей с достаточно короткой длиной волны. Рассмотрим в общих чертах сущность процессов шлифовки и полировки.

**Шлифовка.** Шлифовка является в основном процессом механическим, но она протекала бы медленнее, если бы ей не благоприятствовали сопутствующие химические процессы. Обратимся к рис. 29, на котором схематически изображены: *A* — кусок стекла и *B* — твердый (например, стальной) стержелек, передающий стеклу некоторое внешнее давление *P*; пусть *S* — площадь соприкосновения стерженька со стеклом. Если сила *P* мала или если площадь соприкосновения *S* велика, то удельное давление  $P:S$  мало, и стекло деформируется в пределах упругих деформаций, не проявляя при этом следов разрушения после удаления стерженька *B*.

Начнем повышать удельное давление  $P:S$ , либо увеличивая *P*, либо уменьшая *S* (заостряя конец стерженька) до тех пор, пока усилия не окажутся разрушающими. Стекло в заштрихованном объеме *m* подвергается сжимающим усилиям и стремится оторваться от остальной массы стекла; но так как сопротивление стекла на сжатие больше сопротивления на разрыв, то в результате заштрихованный усеченный конус *m* отрывается от остальной массы стекла и между ними появляется тончайшая коническая трещина, прекращающаяся на некоторой глубине *l*. Разгрузив стержелек *B*, мы освободим объем *m* от сжатия и он возвратится к своему прежнему положению, а стекло примет внешний вид неповрежденного изделия; в худшем случае останется едва уловимая, микроскопическая коническая трещина.

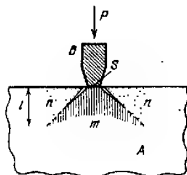


Рис. 29.

Все это было бы так, если бы опыт протекал в вакууме или в абсолютно сухом воздухе. Но даже в Сахаре влажность воздуха не равна нулю; тем более в наших климатах значительной влажности влага воздуха проникает в микроскопическую трещину и в короткий срок изменяет химический состав свежей поверхности излома стекла.

Следует помнить, что чуть ли не у всех тел внешние поверхности, соприкасающиеся в одних случаях с влагой, а в других с кислородом воздуха, существенно отличаются по химическому составу от состава внутри тела. «Свежие изломы» вещества очень быстро покрываются так называемыми *поверхностными пленками* окисного характера. Толщина поверхностных пленок часто не превышает сотых долей световой волны, и дальнейший рост пленок приостанавливается, так как сами пленки оказываются верной защитой для вещества от проникновения через них влаги; такие поверхностные пленки можно назвать *защитными*. В других случаях пленка не защищает вещества от влаги, пропускает ее через себя, а вещество рано или поздно разрушается во всей толще. Так, окисная пленка на алюминии отлично защищает его от дальнейшего окисления; железный же лист рано или поздно будет прорван ржавчиной насквозь.

На свежем изломе стекла, согласно теории акад. И. В. Гребенщикова, образуется под действием влаги тончайшая пленка \*) защитного характера. Для нас важно то обстоятельство, что объем этой пленки больше объема образовавшего ее стекла. Поэтому влага, проникшая в микроскопическую трещину (см. рис. 29), образует пленку, действующую, как распирающий клин. В результате объемы  $n$  —  $n$  не выдерживают распирающих усилий и выкрашиваются.

В случае одновременного действия нескольких стерженьков  $B$  на поверхности стекла окажется несколько конусов  $m$ , окруженных луниками  $n$  —  $n$  выкропившегося стекла. Парадоксальность явления состоит в том, что стекло цело в точках действия силы и разрушено в точках, в которых мы не прилагали никаких сил.

Чем быстрее подводится влага к начальным трещинам, тем интенсивнее идет процесс нарастания поверхностных пленок и разрушения стекла: вот почему в оптике применяется «мокрая», а не «сухая» шлифовка. Но мы знаем, что от избытка воды поверхностная пленка не станет толще своей предельной толщины; так, если для некоторого сорта стекла при некоторой температуре предельная толщина пленки равна, например,  $70 \text{ \AA}$  ( $0,000007 \text{ мм}$ ), то в нашей власти лишь ускорить процесс ее полного образования, но не увеличить ее толщины выше  $70 \text{ \AA}$ . Какие же возможности существуют для увеличения предельной толщины пленки, а вместе с тем и для более энергичного разрушения стекла? Можно воздействовать на толщину пленки изменением температуры, но эффект оказывается слишком незна-

\*) Гель кремниевой кислоты.

чительным. Чтобы получить заметный эффект, следует вызвать рост плешки не под действием чистой воды, а под действием некоторого раствора, химически благоприятного для данного сорта стекла в смысле образования более толстых плешек.

Изложенная здесь в кратких чертах теория шлифовки позволила ее автору — акад. И. В. Гребенщикоу, вместе с группой его сотрудников открыть ряд растворов, оказавшихся «ускорителями шлифовки»; причем для различных групп сортов оптического стекла оказываются свои ускорители. Забегая вперед, скажем, что аналогичная теория полировки позволила И. В. Гребенщикоу с группой его сотрудников открыть специфические «ускорители» и «замедлители» полировки оптического стекла в зависимости от его сорта.

При шлифовке стекла роль стерженьков  $B$  (рис. 29) выполняют зерна шлифующего абразива, нагрузку же  $P$  передает шлифовальник, давящий на зерна своим весом, усиленным, часто, за счет дополнительного груза. Если в процессе шлифовки одновременно участвует  $n$  зерен абразива, то среднее давление  $p$  на каждое зерно определяется, как частное от деления общего давления  $P$  шлифовальника вместе с добавочным грузом на число действующих зерен  $n$ :

$$p = \frac{P}{n}. \quad (76)$$

Давление  $p$  не может быть больше разрушающего для данного зерна, а потому, если  $P$  оказалось слишком большим, часть зерен расколется на более мелкие части, число  $n_1$  работающих более мелких зерен увеличится ( $n_1 > n$ ), и новое давление  $p_1$  на зерно окажется меньше прежнего ( $p_1 < p$ ) и достаточным, чтобы зерна в течение некоторого времени совершали свою полезную работу. Однако измельчение абразива с той или иной скоростью будет неизбежно происходить и дальше, так как при перекатывании зерен между стеклом и шлифовальником во время шлифовки отдельные зерна будут становиться «на ребро», воспринимать временно на себя огромные нагрузки и измельчаться.

Строго говоря, стеклянную поверхность можно отшлифовать, перекатывая по ней под большим давлением слой из стальных мелких шариков от шарикоподшипников; такой опыт, осуществленный проф. И. И. Качаловым, блестяще подтверждает эту возможность.

На рис. 30 показано зерно в двух положениях:

*I* — когда оно лежит на стекле своей гранью  $ab$ , испытывая небольшое давление  $p_1$  на сравнительно большую поверхность  $ab$ , а потому не производя разрушения стекла;

*II* — когда под действием движущегося шлифовальника (в направлении горизонтальной стрелки) оно перекачилось в новое

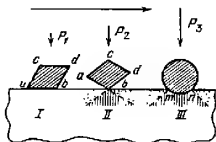


Рис. 30.



положение, при котором точка  $c$  несколько приподнялась над прежним уровнем, а потому зерно получило большее давление ( $p_2 > p_1$ ) и передало это большее давление на малую поверхность (точка  $b$  — вершина угла); по этим двум причинам удельное давление в точке  $b$  окажется очень большим и стекло под точкой  $b$  разрушится, как было показано на рис. 29. Удельное давление может оказаться столь большим, что зерно  $II$  разрушится и пригнущится вблизи точек  $b$  и  $c$ ; вернее же, имея кристаллическую структуру, оно при этом расколется на более мелкие части.

На том же рис. 30 изображен случай шарика ( $III$ ), который, под действием давления  $p_2$ , деформируется сам и деформирует под собой стекло, соприкасаясь с ним не в точке касания, а на значительной поверхности  $mn$ , кривизна которой больше кривизны стекла, но меньше кривизны шарика.

Пришлось бы приложить весьма значительную нагрузку  $p_2$  ( $p_1 > p_2$ ), чтобы вызвать разрушение стекла вокруг поверхности  $mn$ .

**Шлифующие абразивы.** Любые твердые вещества, способные передать шлифуемому изделию разрушающие усилия и не быть мгновенно разрушенными этими усилиями, — оказываются приемлемыми в качестве шлифующих абразивов. Эффективность абразивов в значительной степени зависит от их твердости, но не определяется однозначно в зависимости от одной только твердости.

Можно представить себе два одинаково твердых вещества, т. е. одинаково плохо царапающих друг друга (принцип шкалы твердостей Мооса), но в зернах одного вещества кристаллы будут прочно срослены, а зерна другого вещества будут рыхлыми; первые зерна хорошо и в течение долгого времени будут передавать давления стеклу, вторые же очень быстро превратятся в мелкий порошок. В пределе, когда мы дойдем до отдельных зернышек — кристаллов, определяющих твердость вещества по шкале Мооса, оба вещества, по-видимому, будут обладать одинаковыми или близкими абразивными свойствами; но достаточно крупные зерна абразива в большинстве случаев представляют собой сращение большого числа мелких кристаллов, а силы сцепления между ними меньше сил в естественных спаях кристаллов. Хорошим примером сказанного могут служить нормальный «зеленый» карборунд и «черный» карборунд, изготовлявшийся ранее у нас на первых этапах развития карборундовой промышленности; первый из них производил работу в несколько раз быстрее второго и расходовался на ту же работу в количествах, во много раз меньших.

Наилучшим абразивом является алмаз ( $C$ )\*, производящий обработку стекла со скоростью вне всякой конкуренции с другими абразивами и очень медленно, опять-таки вне всякой конкуренции с другими абразивами, измельчающийся сам. Но алмаз, даже в виде технического порошка, непомерно дорог и применя-

\*) Удельный вес алмаза  $d = 3,5$ .

ется только для распиловки и сверления стекла, когда удается закрепить зерна алмаза, зачеканив их неподвижно в диске алмазной пилы или на кромке трубчатого сверла, и когда приходится считаться только с износом алмазных зерен, а не с уносом их водой вместе с стеклянным и металлическим шламом в корыто шлифовального станка \*).

Следующими по твердости абразивами идут карбид бора, а затем карбид кремния ( $\text{SiC}$ ), названный американцами карборундом \*\*). Карбид бора шлифует приблизительно вдвое быстрее карборунда, по стоимости его пока во много раз выше стоимости карборунда. Поэтому большинство работ по обдирке и круглошпо и даже по распиловке и сверлению производится на карборунде.

Следующим по твердости и по стоимости идет наждак (корунд,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  \*\*\*) различных марок, а вместе с тем и различного абразивного качества. Наждак заметно уступает карборунду при крупнозернистых номерах, т. е. в работах по приданию грубой формы и при грубой шлифовке; вместе с тем он вполне конкурирует с карборундом в мелких фракциях, т. е. в работах по тонкой шлифовке. Больше того, оптики предпочитают наждак карборунду при тонкой шлифовке, считая, что при этом матовая поверхность получается более нежной и лучше подготовленной к полировке и что при наждаке легче избежать появления случайных царапин на стекле. Объясняется это, по-видимому, различием формы кристалликов наждака и карборунда: первые приближаются к форме шестиугольных призм и при «отмучивании» дают достаточно однородные фракции; вторые часто имеют форму чешуек, оседающих при «отмучивании» с недостаточной скоростью, а потому оказывающихся теми вредными крупными включениями в мелкую фракцию, которые и производят досадные царапины на тонко отшлифованном стекле.

Самым дешевым, но и самым непроизводительным абразивом является кварцевый песок. Астрономическая оптика предпочитает не пользоваться этим абразивом, так как стоимость абразива по сравнению с остальными затратами на изготовление астрономической оптики является величиной исчезающе малой.

Крупные номера наждака или карборунда получаются путем дробления кусков материала и просеивания сквозь сита с различными размерами отверстий.

Англичане связывают номер абразива с числом отверстий в одном погонном дюйме сита; у немцев другая система обозначений. Для нас, конечно, важно не наименование номера абразива, а средний размер его зерен. Абразив высокого качества должен, помимо твердости, обладать однородностью размеров зерен, т. е. в нем должно быть возможно меньшее количество зерен более

\*) Разработка технологии получения искусственных технических алмазов удешевила эти процессы. (Прим. ред.)

\*\*) Удельный вес карборунда  $d = 3,1-3,2$ .

\*\*\*) Удельный вес наждака  $d \approx 4$ .

крупных и менее крупных, чем средний размер; кроме того, как максимальные, так и минимальные размеры зерен должны возможно меньше отличаться от среднего (номинального) размера зерна. Крупные зерна способны исцарапать поверхность изделия и, во всяком случае, не благоприятствуют получению равномерной поверхности; мелкие зерна замедляют обработку, так как не участвуют в работе до тех пор, пока более крупные зерна не измельчатся до их размера.

Мелкие номера шлифующего абразива получаются не путем просеивания через сита, а отмучиванием в жидкости. Возьмем в сосуде с водой мелкую наждачную, карборундовую или иную

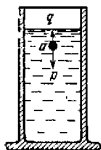


Рис. 31.

абразивную пыль или измельченный предшествовавшей шлифовкой абразив; через некоторое время  $t$  наиболее крупные частицы успеют опуститься на дно сосуда, остальные же частицы окажутся в воде во взвешенном состоянии; слив эту воду в новый сосуд и дав взвешенным частицам отстояться в течение достаточно длительного времени, мы получим осадок, который может быть назван  $t$ -минутным (и мельче) отмученным абразивом.

Между временем отмучивания  $t$  и размером зерен должна существовать некоторая закономерная связь. Для обнаружения этой связи обратимся к рис. 31, изображающему глубокий сосуд с водой и зерно  $a$ , начавшее свое падение на дно под действием силы тяжести. Для простоты рассуждений предположим, что зерно имеет форму шарика, т. е. что падение зерна не будет зависеть от его ориентировки в пространстве.

Пусть радиус зерна равен  $r$  и пусть удельный вес зерна равен  $d > 1$ ; в таком случае сила  $p$ , тянущая зерно ко дну, равна объему зерна, умноженному на  $(d - 1)$ :

$$p = \frac{4\pi r^3}{3} \cdot (d - 1). \quad (77)$$

Под действием этой силы зерно будет двигаться ускоренно с возрастающей скоростью  $v$ . Но как только зерно начнет двигаться, возникнет сила  $q$  сопротивления воды, противодействующая этому движению и зависящая от скорости ( $v$ ) движения, формы зерна (в нашем случае шаровой), его размеров (радиуса  $r$ ) и свойств сопротивляющейся среды (вязкости). Сила  $q$ , согласно закону Стокса, может быть выражена следующим образом:

$$q = krv, \quad (78)$$

где коэффициент  $k$  зависит от формы движущегося тела и от вязкости сопротивляющейся среды (в нашем случае воды при комнатной температуре).

Таким образом в действительности зерно движется не под действием силы  $p$ , но под действием разности сил  $p - q$ . Сила  $q$  очень быстро уравнивается по величине с силой  $p$ , разность  $p - q$

обращается в нуль, зерно освобождается от действия сил и продолжает равномерно (по инерции) опускаться на дно сосуда с наивысшей достигнутой им при этом скоростью  $v$ .

Ставя знак равенства между выражениями (77) и (78), определяем скорость падая зерна:

$$v = k_1 r^2 (d - 1), \quad (79)$$

где коэффициент  $k_1$  включает в себя и особенности формы зерна и вязкость воды.

Таким же образом:

$$r = k_2 \sqrt{\frac{v}{d - 1}}, \quad (80)$$

где  $k_2$  — некоторый новый коэффициент, аналогичный  $k_1$ .

Предположим, что брошена горсть размельченного абразива в сосуд (рис. 31) и предположим, что зерна с поперечником 1 мм опустились на дно через 1 мин. Тогда, согласно (79) или (80), зерна с поперечником  $1/2$  мм осадут на дно через 4 минуты, с поперечником  $1/4$  мм — через 16 мин, и т. д. Увеличивая время отмучивания вдвое, мы осаждаем зерна с поперечником в  $\sqrt{2}$  меньшим; желая оставить во взвешенном состоянии зерна вдвое меньшего поперечника, мы должны увеличить время отмучивания в 4 раза.

Выражение (79) говорит еще и о том, что чем меньше отличается удельный вес ( $d$ ) абразива от удельного веса воды (единица), тем медленнее будет происходить осаждение в воде зерен данного размера и данной формы. Поэтому в производственной практике следует остерегаться, чтобы в наждачный шлам, из которого мы будем отмучивать мелкие наждаки («минутники»), не попали зерна карборунда. Действительно, так как для наждака  $(d - 1) \approx 3$ , а для карборунда  $(d - 1) \approx 2$ , то в силу одной только этой причины зерна карборунда будут оседать со скоростью в 1,5 раза меньшей, чем зерна наждака того же размера; но зерна карборунда, кроме того, часто имеют невыгодную, «плохообтекаемую» форму, а потому, в действительности, засорение отмученного наждака более крупными, и в то же время более твердыми, зернами карборунда будет еще значительнее и опаснее.

Мы описали один из возможных принципов отмучивания мелких наждаков, так называемых «минутников». Возможен и другой принцип отмучивания, состоящий в том, что жидкость (вода) вместе с измельченным абразивом приводится в движение с той или иной скоростью, благодаря чему зерна абразива до того или иного предельного диаметра оказываются взвешенными в жидкости (взмученными), тогда как зерна более крупные не участвуют в движении и оседают на дно. Так и в тихих речках оказывается взмученным только мелкий ил, тогда как в быстрых горных речках взмучивается крупный песок и даже галька, и только камни остаются лежать на дне.

В первом способе отмучивания номер или мелкость абразива определяется временем отстойки жидкости при заданных условиях эксперимента: высота сосуда, высота уровня, с которого мы отсасываем взмученную жидкость с помощью сифона, весовое отношение абразива к воде и т. д. Во втором способе номер абразива определяется скоростью движения суспензии (взвесь абразива в воде), также при заданных условиях эксперимента. В конечном результате нас будет интересовать не наименование номера абразива, а средний размер его зерен и степень однообразия размеров различных зерен данной фракции.

Таблица 16

| Сеянные абразивы           | № 12  | № 24  | № 36     | № 60     | № 100    | № 140     | № 200     |
|----------------------------|-------|-------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Отмученные абразивы        |       |       |          |          |          |           |           |
| Средний размер зерен в мкм | 1400  | 650   | 420      | 210      | 130      | 97        | 68        |
| Сеянные абразивы           | № 270 | № 325 |          |          |          |           |           |
| Отмученные абразивы        |       |       | 15<br>мш | 30<br>мш | 60<br>мш | 120<br>мш | 240<br>мш |
| Средний размер зерен в мкм | 48    | 39    | 24       | 17       | 12       | 8,5       | 6         |

В табл. 16 приведены обозначения и средние размеры зерен для абразивных порошков различной крупности\*). Первая строка таблицы относится к сеянным, крупнозернистым порошкам, а номер порошка соответствует числу отверстий в дюймовом сита (английская система). Вторая строка относится к отмученным, мелкозернистым порошкам с обозначением числа минут их отмучивания при некоторых стандартных условиях отмучивания. В третьей строке даны средние размеры зерен, выраженные в микрометрах.

В таблице представлен далеко не весь ассортимент номеров сеянных абразивов; средние размеры зерен, как мы увидим дальше, являются весьма приближенной характеристикой.

Табл. 16 дает нам очень разнообразный ассортимент размеров, начиная от почти полуторамиллиметрового зерна (№ 12) и кончая зерном размером 6 микрометров (240 мш).

\*) Приведенные в табл. 16 и 17 характеристики и обозначения абразивных порошков несколько отличаются от общесоюзного стандарта. Современным обозначением абразивных материалов см. в ГОСТ 3647-80. (Прим. ред.)

Чтобы показать, насколько неоднородны зерна каждого данного сорта (номера или фракции) по своим размерам, возьмем для примера 240-минутный (т. е. 4-часовой) отмученный наждак высокого качества и покажем в табл. 17, в каких количествах можно в нем ожидать зерен более крупных и менее крупных, чем номинальный размер 6 мкм.

Таблица 17

| Размер зерен<br>в мкм                                    | до 17           | от 14<br>до 10 | от 10 до 7 | от 7 до 5    | от 5<br>до 3,5 | менее<br>3,5 |
|----------------------------------------------------------|-----------------|----------------|------------|--------------|----------------|--------------|
| Процентное содержание таких зерен в 240-минутном наждаке | Единичные зерна | Менее 2%       | Около 21%  | Не менее 55% | Около 19%      | Менее 4%     |

Вот что такое 240-минутный отмученный наждак высокого качества с номинальным размером зерна 6 мкм! В нем лишь немногим более половины зерен (по весу) уместается в интервале 7 мкм — 5 мкм, остальные же группируются влево и вправо от номинального размера, имея верхний предел 17 мкм и нижний предел 0 мкм. Если это имеет место в наждаке высокого качества, то в наждаках более низкосортных, по также 240-минутных, кривая распределения размеров зерен имеет более низкий максимум и распространяется несколько за пределы границы в 17 мкм.

При тонкой шлифовке наждаком (табл. 17) в первые же секунды происходит измельчение одиночных зерен с размером до 17 мкм; затем очень скоро измельчаются и зерна, превосходящие 7 мкм; в течение сравнительно долгого времени шлифовку производят зерна основного размера фракции (от 7 мкм до 5 мкм); наконец, измельчаются и эти зерна, и при последней порции наждака мы закалчиваем шлифовку на зернах, по-видимому, меньших 5 микронетров.

Допустим, что каким-то образом изделию придана грубая форма, и мы переходим к шлифовке, решив начать грубую шлифовку сеяншим наждаком № 270, т. е. имеющим средний размер зерен 48 мкм (табл. 16).

К моменту шлифовки матовая (после обдирки) поверхность стекла испещрена мелкими ямками, прилегающими друг к другу и образовавшимися, как это было пояснено на рис. 29, в процессе обдирки при работе абразивом более крупным, чем № 270. Допустим, что средняя глубина ячеек «мата» близка или даже несколько превышает размер зерен наждака № 270, и изобразим схематически на рис. 32 микропрофиль изделия А и шлифовальника В, а также три абразивных зерна а, б и с, попавших в глубокую ячейку мата и увлекаемых шлифовальником в направлении его движения (по стрелке). Нетрудно увидеть, что шли-

фовальник передает давление частице *a*, частица *a* передает это давление частице *b* и, наконец, частица *b*, скользя по дну ячейки, приподнимет частицу *c* и заставит ее одной гранью упереться в шлифовальник, а другой надавить на стекло в точке *m* и вызвать выкрашивание объемов *n-n*.

В результате такой комбинированной передачи давления буророк мата снизятся, и скоро остающаяся глубина ячеек станет равной и даже меньшей, чем размер примененных шлифующих зерен, когда каждое зерно сможет непосредственно производить работу шлифовки.

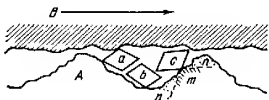


Рис. 32.

тором перерасходе абразивного материала, располагающегося на изделии более чем в один слой.

После достаточно долгой шлифовки возобновляемыми порциями наждака данного номера, мы получим матовую поверхность с размерами ячеек, соответствующими данному номеру, причем средняя глубина ячеек будет того же порядка (вернее же, несколько меньше), что и средний размер зерен. Но нужно помнить, что под собственно матовым слоем стекла имеется еще подслоя стекла, разрушенного мельчайшими, трудно обнаруживаемыми микроскопическими трещинками, а потому шлифовку каждым номером абразива следует продолжать дольше, чем это необходимо для видимой смены предыдущего более грубого мата на новый более мелкий и равномерный мат.

После такой шлифовки микропрофиль изделия приобретает вид, изображенный на рис. 33. Здесь прерывистыми линиями показаны предшествовавший матовый слой и поврежденный подслоя, а сплошными линиями изображены матовый слой и новый подслоя микроскопических трещин, менее глубоких, чем в первом случае.



Рис. 33.

При массовом заводском производстве выгодно чередовать номера наждаков в такой последовательности, чтобы каждый вновь примененный более мелкий номер сразу же начинал работать с полной эффективностью: это сокращает продолжительность производственного процесса и излишний расход абразива. Иными словами, для заводского производства желательно иметь более мелкие ступени перехода от одного номера к другому при большем их числе, но зато и при значительно более быстром пробегании по ступеням такой лестницы.

В уникальном производстве крупной астрономической оптики вопрос о выборе числа и размера ступеней решается иначе. При переходе от одного номера наждака к другому требуется тщательно промыть и очистить поверхность изделия от одиночных крупных зерен предыдущей фракции наждака, а также от случайных твердых частиц, попадающих на поверхность из воздуха с частей шлифовальной машины, с потолка или с недостаточно чистых губок или тряпок. Так как астрономическая оптика оперирует с крупными поверхностями, то такая очистка занимает много времени, трудно контролируется и не обеспечивает уверенности в том, что в самый последний момент, во время наложения шлифовальника на изделие, не влетит между их поверхностей вредная соринка и не испаряет в дальнейшем нежную матовую поверхность. Уж лучше примириться с несколько более медленной шлифовкой, излишнее время «подмазывать» кисточкой свежие порции наждака данного номера, не снимая шлифовальника с изделия, но не затрачивать лишнее время на тщательную очистку поверхностей и не рисковать лишним раз появлением роковых царапин.

Поэтому более чем достаточно переходить от одного номера абразива к другому с вдвое меньшим размером зерен. Обращаясь к табл. 16, можно рекомендовать следующий набор номеров абразива для всех операций, — начиная с грубого придания формы и кончая тонкой окончательной шлифовкой:

№ 36, № 60, № 140, № 270 (или 4 мин.),

15 мин., 60 мин., 240 мин. (81)

Я был бы склонен предложить еще более «крутую лестницу»:

№ 36, № 100, № 270 (или 4 мин.), 30 мин., 120 мин. (82)

После окончательной тонкой шлифовки 240 или 120-минутным наждаком толщина матового слоя, вместе с поврежденным подслоем, измеряется несколькими микрометрами. Оба эти слоя подлежат снятию в процессе полировки, к описанию которой мы и перейдем.

**Полировка.** Проведем такой опыт: помажем оконное стекло разведенным мелом, дадим высохнуть меловой пленке, а затем плотно приложим к стеклу влажную ладонь руки; оторвав от стекла руку, мы обнаружим, что в отдельных местах стекло отстилось от меловой пленки, которая перешла к нам на ладонь.

Или еще один опыт: посеребрим поверхность стеклянного зеркала и попытаемся сорвать замшевым тампоном серебряную пленку со стекла. Сухая чистая замша не оторвет этого слоя, даже если ею энергично тереть поверхность зеркала; но стоит увлажнить замшу и тем увеличить силы сцепления между ней и серебряным фильмом, как отдельные его участки, менее прочно связанные со стеклом, перейдут на замшу и оголят стекло. Еще лучше слегка натереть замшу канфолью (как то делают гимна-



сты с подошвами своих туфель, ради увеличения трения), а затем с усилием потереть таким тампоном зеркало; в этом случае значительное само по себе сцепление увеличится еще благодаря значительному трению и повышению температуры на элементах соприкосновения; кроме того, отдельные крупицы прилинувшей к серебру капифоли будут производить местные разрушения (царапание) серебряного фильма, облегчая его срыв по частям.

Сущность процесса полирования, весьма возможно, близка к сущности описанных выше опытов. Стекло — матовое или глянцевое — покрыто, как мы помним, тончайшей защитной пленкой, измеряющейся малыми долями микрометра; между этой пленкой и остальной массой стекла существуют некоторые силы сцепления; если бы нам удалось осуществить такой полировальныйник, при котором силы сцепления между ним и поверхностной пленкой оказались больше сил сцепления между пленкой и стеклом, — пленка могла бы быть сорвана со стекла и перешла бы на полировальныйник.

Этот эффект был бы достигнут проще и надежнее, если бы, кроме того, удалось каким-то образом расщепить сплошную пленку на мелкие элементы, т. е. исцарапать ее, а затем уже срывать ее по частям со стекла.

Процесс полировки стекла, возможно, в том и состоит, что полировальныйник с закрепленными в нем абразивными зернами расщепляет на мелкие элементы поверхностную пленку и срывает ее по частям со стекла; под действием же влаги (оптический полировка принадлежит к числу «мокрых» процессов) на оголенной поверхности стекла образуется новая защитная пленка, которая снова срывается полировальником, и так далее до бесконечности. Таким образом процесс полировки (по Гребенщикову) состоит в постоянном срыве поверхностных пленок стекла и их попутном наращивании; при этом полируемое стекло постепенно срабатывается, а уровень его поверхности все снижается и снижается, пока не опустится до нижней границы поврежденного шлифовкой подслоя, после чего полировка, как таковая, окончена \*).

Как видим, изложенная здесь теория процесса оптической полировки требует наличия трех факторов: 1) достаточно твердых частиц, способных царапать и нарушать целостность поверхностной пленки; 2) поверхностей, прилегающих плотную (в молекулярном масштабе) к поверхностной пленке стекла и обладающих высоким сцеплением с пленкой; 3) воды (или воды с ускорителем) для быстрого возобновления новой поверхностной пленки на месте сорванной; вода, кроме того, частично уносит с собой шлам из отработавших зерен полирующего абразива и частиц сорванной поверхностной пленки, благодаря чему поверхность полировального не так быстро засоряется этим шламом и не так часто

---

\*) Изложенная здесь «химическая» теория полировки стекла, по-видимому, является односторонней, так как с успехом можно развить ее менее стройную «механическую» теорию полировки и подкрепить ее экспериментом.

требует своего освежения путем «подрезки»; наконец, вода охлаждает полировальник, совершающий значительную работу по преодолению сил трения и сил сцепления и не позволяет ему заметным образом размягчиться, доформироваться и терять свои выгодные для полировки свойства, приспособленные к сравнительно узкому температурному интервалу.

Не останавливаясь на интересной истории развития полировального искусства, рассмотрим полировку в том виде, в каком она применяется в наше время при изготовлении астрономической оптики.

В качестве полирующего абразива оптики предпочитают *крокус* ( $F_2O_3$ ) — специально прокаленную красную окись железа. Зерна крокуса очень мелки и, по-видимому, мягче зерен паждака.

По твердость и прочность зерен крокуса достаточна, чтобы воплотиться, как гвозди в дерево, в мягкое смоляное тело полировальника, а затем в таком благоприятном закреплении царапать и рвать на части тончайшую поверхностную пленку стекла; застрявшими в смоле зернам отчасти помогают в работе избыточные свободные зерна крокуса, перекатывающиеся до поры до времени между поверхностями стекла и полировальника. Но проходит некоторое время и часть укрепившихся зерен засасывается смолой окончательно и перестает производить скобление поверхностной пленки; на их место становятся свободно перекатывающиеся зерна, укрепляются в смоле и поддерживают ее поверхность в виде подобия микроскопически-мелкой наждачной бумаги. На рис. 34 схематически изображены: *П* —

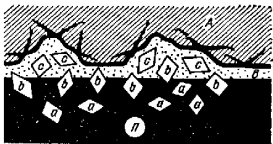


Рис. 34.

смоляной слой полировальника, *а* — зерна крокуса, ушедшие в смолу и прекратившие работу, *б* — рабочие зерна крокуса, укрепившиеся в смоле, *с* — свободно перекатывающиеся зерна, *А* — изделие с матовой частично отполированной поверхностью, покрытой поверхностной пленкой (черная линия утравленной толщины), *В* — слой воды между полировальником и стеклом.

В изображенный на рисунке момент частица *б* скоблит и сдирает поверхностную пленку на уже отполированной элементарной площадке стекла.

Чем мягче смола полировальника, тем глубже и в большем количестве будут уходить в нее зерна *а*, мало изнашиваясь, но и производя малую полезную работу.

В случае твердой смолы зерна *б* медленно в нее вонзаются, а потому способствуют образованию более толстого водяного слоя между стеклом и смолой, т. е. уменьшению между ними сил сцепления.

Иначе говоря, при мягкой смоле срыв поверхностной пленки происходит, главным образом, за счет ее сцепления со смолой при незначительной помощи скользящих зерен *b*; при твердой же смоле срыв пленки обеспечивается, главным образом, за счет ее соскабливания зернами *b*. И одна и другая крайности плохи: первая — как малопроизводительная работа при быстро деформирующейся поверхности полировальника; вторая — как процесс, не обеспечивающий полного взаимного приспособления поверхности полировальника и поверхности изделия.

Поэтому полировочная смола, в зависимости от температуры, режима работы и материала изделия, должна подбираться некоторой оптимальной твердости (текучести); очень важно правильно подобрать текучесть смолы.

Действительно, поверхность полировальника должна успеть приспособиться к форме поверхности полируемого изделия за очень короткое время; при полировке асферических поверхностей форма поверхности полировальника существенно изменяется за время одного «штриха» (перемещении полировальника от одной мертвой точки к другой), т. е. буквально за одну или несколько секунд; если бы смола полировальника не обладала извистой текучестью, а представляла бы собой твердое тело, то полировка асферических поверхностей совершалась бы на отдельных точках или линиях (зонах), а не на достаточно больших участках поверхности; такая полировка была бы крайне медленной и неравномерной и обращала бы, рано или поздно, асферическую поверхность в сферическую. Но текучесть смолы необходима не только для полировки асферических поверхностей; поверхности сферические, и в частном случае плоские, требуют также текучих (хотя и в меньшей степени) полировальников: в противном случае приспособление полировальника к поверхности изделия шло бы слишком медленно, полировка осуществлялась бы в течение долгого времени отдельными точками или зонами полировальника, а кривизна поверхности изделия стремилась бы оставаться равной кривизне полировальника, тогда как в процессе полировки мы обычно стараемся повлиять на кривизну и изменить ее в нужную сторону.

Направляются сами собой следующие выводы:

1. Если оптической поверхности, сферической или плоской формы, придана в процессе тонкой шлифовки точная кривизна и мы не хотим ее изменить во время полировки, то текучесть смолы должна быть минимальной и лишь достаточной, чтобы полировальник мог медленно «заплывать» после его «подрезки», т. е. приходить в полное соприкосновение с полируемой поверхностью в точках, в которых он был соскоблен ножом (подрезан).

2. Если мы ожидаем, что тонкоотшлифованная сферическая или плоская поверхность имеет недостаточно строго воспроизведенную расчетную кривизну и что в процессе полировки придется несколько изменить кривизну в нужную сторону, то сле-

дует применить более текучую смолу, а на кривизну влиять подрезкой полировальника и длиной штриха.

3. Если ожидается, что после тонкой шлифовки поверхность приобрела зональные или местные ошибки, которые надлежит устранить полировкой, придав поверхности, прежде всего, точную сферическую форму независимо от ее кривизны, то следует снова обратиться к смолам малой текучести.

4. При изготовлении ретушированных линз или призм, параболических зеркал и, вообще, поверхностей асферических, желательно применение текучих смол, сохраняющих за счет большой текучести и быстро происходящих деформаций постоянный контакт с полируемой асферической поверхностью на протяжении всей длины штриха или большей части этой длины.

5. Чем больше удельное давление или чем выше температура, ожидаемые при полировке, тем меньше должна быть текучесть смолы.

6. Чем толще слой смолы на полировальнике и чем на более мелкие элементы он расчленен подрезкой или выдавливанием канавок, тем менее текучей может быть смола.

Наиболее подходящей и излюбленной у оптиков смолой для полировки оказывается смесь пека с капифолью. У чистого пека (черный «сапожный» пар) текучесть чрезмерно велика; поэтому, смешивая пек и капифоль в различных соотношениях, можно получать полировочные смолы различной текучести.

Пек и капифоль, отмеренные на весах в пухлом весовом соотношении для данного номера смолы, варятся при постоянном их размешивании. Температура должна быть близкой к температуре кипения смолы, но смола не должна бурно кипеть и пузыриться; в противном случае из нее выпарятся в значительном количестве летучие вещества, обуславливающие эластичность смолы, а остывшая смола получит губчатое строение и станет хрупкой и непригодной для полировки.

Размешивание не только препятствует пузырению, но и способствует получению однородной смеси пека и капифолли; недостаточно однородная смола совершенно не пригодна для наших целей, так как в этом случае отдельные участки полировальника, относительно более богатые капифолью, начинают действовать как энергичные местные полировальники, а на полируемой поверхности соответственно появляются углубленные зоны.

В деле исследования, классификации и стандартизации смол долго царил достаточный хаос. Так как пек может быть различного происхождения, состава и свойств и так как от температуры и продолжительности варки смолы зависит количество потерянных летучих веществ, то полирующие свойства смолы одного и того же весового состава (номер смолы) могут различаться в широких пределах.

В результате, даже в наше время, окончательную оценку и выбор смолы часто делает мастер-оптик, применяя для этого один из трех первобытных методов контроля: «на зуб», «на ноготь»

и «на монету». Иначе говоря, опытный полировщик испытывает текучесть куска смолы, надкусывая ее зубами, или вдавливая в нее ноготь, или, наконец, вдавливая накатанную кромку невеликого двугривенного и определяя свойства смолы по мускульному ощущению и глубине выдавленного следа.

В оценке качества полировочной смолы я являюсь таким же первобытным дикарем, как и описанный выше оптик-полировщик, хотя давно уже предлагал и предполагал систематизировать контроль смол. Для этого, мне казалось, лучше всего применить

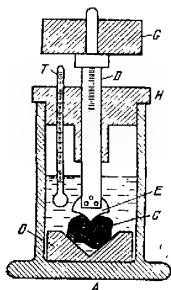


Рис. 35.

прибор и метод, схематически изображенный на рис. 35. В сосуд А, заполненный водой, опускается на дно массивная плитка В с наложенным на нее образцом смолы С. Через крышку Н проходит легкий трубчатый стержень Д, с укрепленным на нижнем конце наконечником Е в виде шарика, конуса или клиновидной пластинки особой формы. Сперва производится первый отсчет по шкале стержня Д, соответствующий прикосновению к смоле наконечника Е при сравнительно незначительном давлении; затем на стержень Д накладывается значительный дополнительный груз Г и производится второй отсчет по шкале Д; разность отсчетов характеризует проникновение наконечника Е в образец смолы под действием груза Г. Если бы образец С был твердым телом, то второй отсчет удерживался бы неизмен-

ным неопределенно долгое время. Но смола обладает текучестью, а потому с течением времени проникновение наконечника Е в смолу будет увеличиваться, а по истечении того или иного времени наконечник пройдет через всю толщину смолы и упрется в твердую плитку В. Поэтому, по прошествии некоторого заранее обусловленного времени, делаем третий отсчет по шкале Д, а разность третьего и второго отсчетов будет характеризовать текучесть смолы.

Температура смолы определяется температурой воды, температура же воды измеряется термометром Т. Условия эксперимента всегда можно стандартизовать.

Остается неясным вопрос: стоит ли осложнять дело там, где дальнейшие ногти или опытная полировка малого изделия на малом полировальнике приводят оптика к необходимым заключениям?

Все это, по-видимому, очень рационально для заводского производства массовой оптики, но мастера уникальной астрономической оптики обычно сами «колдуют» над смолой: варят ее, размешивают, процеживают через различные сита, делают пробные полировальнички, пробуют смолу на зуб или на ноготь, снова добавляют камифоли, или вара, или скиншадара и т. д., пока не остаются довольными своим «эслеем».

Заметим также, что хороший оптик может хорошо отполировать изделие даже на весьма неподходящей по текучести смоле; важно только, чтобы эта смола была однородна в своей массе.

Во время полировки крупных поверхностей значительная и чуть ли не большая часть времени тратится оптиком на изучение индивидуальных свойств и поведения данного полировальника. В соответствии с этим оптик пробует различные комбинации под-резки полировальника и длины и направления штриха, пока не убеждается, что форма полируемой поверхности стала изменяться в нужном направлении. Если на этой стадии вы предложите ему перейти на новый полировальник из наиболее подходящей и рациональной смолы, то он, конечно, отвергнет ваше предложение и не пожелает тратить новое время на изучение индивидуальных свойств нового якобы лучшего полировальника. Лучшим для оптика полировальником является тот, свойства которого оптик изучил и работой которого может сознательно управлять.

Не будем здесь описывать других возможных материалов для полировальника (фетр, сукно, шелк, бумага, пробка и т. д.); все они качественно уступают полировочной смоле и не позволяют получить идеально гладкую оптически отполированную поверхность; все они оставляют на поверхности изделия мельчайшую микроскопическую рябь, часто превышающую  $\frac{1}{2}\lambda$  и создающую в приборах, в большей или меньшей степени, вредный ореол рассеянного света вокруг точечного изображения.

Подробнее следует остановиться на предложении \*) покрывать смолы полировальник тонкой пленкой воска. Сам по себе воск мало пригоден для полировальника; по если основу полировальника сделать из смолы, покрыть ее тонким слоем воска, то такой полировальник будет обладать текучестью смолы и хорошо приспособляться к форме полируемой поверхности; восковой же слой определит поверхностные свойства полировальника и приведет к уменьшению сил трения и сцепления между стеклом и полировальником. Такой полировальник будет работать медленнее смоляного, но при этом он потребует и меньших усилий для своих перемещений по поверхности изделия, т. е. меньшей мощности моторов полировальной машины, меньших в ней напряжений и меньшего ее износа. Полировальники с восковым слоем поверх смолы можно рекомендовать для полировки очень крупных поверхностей, особенно в случаях, когда мы ограничены в мощности мотора, когда приводные ремни плохо рассчитаны и буксуют и когда полировальная машина имеет зыбкую, недостаточно жесткую и прочную конструкцию. Такие же полировальники оказали мне большие услуги при экспериментировании по полировке зеркал из некоторых металлов и их сплавов.

Шлифовка и полировка металлов и стекла, по-видимому, принципиально мало отличаются друг от друга, хотя количественно

\*) Не зная более ранних авторов этого предложения, я называю его автором проф. Ричи.

здесь наблюдаются значительные различия. При шлифовке металлов химические факторы в большинстве случаев в малой степени ускоряют процесс разрушения материала. Шлифовка металлов происходит, главным образом, за счет выщербливания отдельных зернышек, оказавшихся ослабленными из-за появления микроскопических трещин. Во всяком случае, если бы в металлах образовывались столь же глубокие трещинки, что и в стекле, и если бы они обрастали столь же мощными расклинивающими поверхностными пленками, то разрушение металла при оптической шлифовке происходило бы с конкурирующими для стекла скоростями.

В действительности, за исключением некоторых алюминиево-магневых сплавов, мы этого не наблюдаем. Так, при шлифовке диска из стекла пирекс, на латунном шлифовальнике того же диаметра мы наблюдали, что скорости сошлифовывания (по объему) стекла и латуни приблизительно относятся, как 25 : 1.

Такое относительно медленное сошлифовывание латуни (а также и чугуна) очень благоприятно для целей шлифовки стекла: шлифовальник мало изнашивается и мало изменяет свою форму и кривизну во время обработки на нем стеклянного изделия; поэтому, шлифовальник строго выдержанной формы и кривизны способен пропустить через себя несколько стеклянных изделий, прежде чем форма и кривизна шлифовальника существенно изменятся и потребуют восстановления путем подрезки или проточки шлифовальника; или, имея шлифовальник заданной кривизны, можно сравнительно долго шлифовать на нем линзу не вполне подходящей кривизны и с значительным припуском по толщине и при этом быть уверенным, что к концу работы как линза, так и шлифовальник приобретут одинаковую кривизну, очень близкую к первоначальной кривизне именно шлифовальника, а не линзы. В то же время малая скорость сошлифовывания некоторых металлов является прямым недостатком, когда мы из такого металла шлифуем зеркало. Процесс шлифовки стали заметно ускоряется при замене воды керосином. Стальные и вообще металлические зеркала следует шлифовать, возможно более мелкими наждаками, так как в вязком металле, в отличие от хрупкого стекла, зерна абразива застревают буквально, как гвозди в дерево, и создают очень твердую пленку, засоренную зернами абразива и окислами в промежутках между зернами абразива.

Но металлические зеркала допускают придание грубой и даже полуточной формы на обычных металлообрабатывающих станках. Поэтому, если при металлических зеркалах длительно протекает тонкая шлифовка и полировка, то, в качестве компенсации, грубая обдирка, грубая и средняя шлифовка заменяются в них быстрым механическим процессом проточки на токарном станке и подтачивания или местной подшлифовки наждачными бумагами. После такой предварительной тщательно проведенной обработки металлическое зеркало можно шлифовать, если и не 240-минутным наждаком, то, во всяком случае, наждаком 60-минутным. После оптической шлифовки, как было сказано, поверх-

поверхность металлического зеркала покрыта коркой окислов и застрявших абразивных зерен, и эту корку следует удалить перед началом полировки, так как в противном случае изделие будет действовать на полировальныйник как наждачная бумага, соскабливая полирующий слой и разрушая полирующую поверхность.

Наилучшим способом для срыва вредной корки оказался следующий предложенный мной способ: готовим полировальныйник из смолы, заключаем между зеркалом и полировальнымником порцию мелкого наждака с водой, а затем выполняем процесс, который пельзя назвать или шлифовкой, или полировкой, так как шлифовка предполагает наличие жесткого (а не мягкого) шлифовальника, а полировка производится крокусом (а не наждаком).

При этом процессе часть зерен наждака закрепляется в смоле, образуя подобие наждачной бумаги, а часть зерен свободно перекатывается; и те и другие зерна стремятся разрушить корку и постепенно извлечь из нее отдельные зерна застрявшего наждака. Но не будет ли тенденция у этих выпавших зерен или у других, свободно перекатывающихся, снова вонзиться в металл? Нет, такой тенденции у них не будет, так как со стороны полировальника они имеют очень мягкий материал, удобный для заклинивания в него. В результате и окисная пленка и застрявшие зерна наждака будут удалены с поверхности зеркала и перейдут в смолу полировальника и частично в шламм. Полученная таким образом поверхность зеркала еще не отполирована, хотя и отражает едва-едва свет; но она освобождена от вредной корки и подготовлена к последней операции — полировке.

Для полировки металлов могут служить различные полировальные слои и различные полирующие порошки. Но и здесь нужно сказать, что наилучшего качества оптические поверхности осуществляются только у тех металлов и сплавов, которые можно полировать на смоле. Если же для осуществления полировки приходится отойти от обычного для стеклянной оптики метода полировки и применять какие-то экзотические вещества и приемы, то можно достаточно уверенно сказать, что материал для зеркала выбран неудачно. Нержавеющая сталь и хром вполне поддаются обычной оптической полировке, а потому зеркала из нержавеющей стали или любые другие хромированные зеркала могут быть выполнены в виде оптических зеркал.

Полирующим порошком может служить не только крокус, но и многое другое, и в частном случае очень благоприятная для хромированных зеркал окись хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), называемая шпога и отличающаяся от красного или железного крокуса зеленым или хромовым крокусом. Мы не можем здесь рассматривать более подробно технологию оптической обработки различных металлических зеркал; повторим только, что будущее за металлическими сотовыми зеркалами и что зеркала из нержавеющей стали или стальные хромированные стоят на пороге внедрения, а следом за ними идут наиболее, пожалуй, интересные зеркала из хромированного алюминия или его сплавов.



## ОБРАБОТКА КРУПНОЙ ОПТИКИ

Настоящую главу мне представляется полезным начать с краткого описания процесса ручного изготовления астрономических зеркал: на таком процессе проще всего показать специфические особенности обработки оптики; кроме того, любители, увлекающиеся или развлекающиеся собственноручным изготовлением зеркал для телескопов, почерпнут некоторые полезные дополнительные сведения.

В этом случае пехитрая шлифовальная машина состоит из стола с укрепленным на нем обрабатываемым изделием (или шлифовальником) и работающего мускульной силой человека. В XX веке таким человеком может быть только фанатик и энтузиаст астрономической оптики, так как ручная обработка астрономических зеркал достаточно трудна и утомительна, а при больших их размерах — даже изнурительна; но, к счастью для науки и для самой жизни, энтузиасты никогда не переводятся.

Мощность человека, работающего длительно и при заметном, но не чрезмерном, напряжении, близка к  $\frac{1}{10}$  лошадиной силы. Ручная шлифовка и полировка позволяет изготавливать зеркала с диаметром до 300—400 мм, а при алюминиевых ребристых шлифовальниках — даже до 500 мм. Отсюда мы видим, что для машинного изготовления современных весьма крупных зеркал требуются совсем не такие уж большие мощности.

Шлифовальным столом может служить бочонок, загруженный камнями, прочный квадратный столик, дополнительно загруженный или прикрепленный к полу, и т. д.; наилучшим шлифовальным столом является массивный трехногий табурет надлежащей высоты, прочно привинченный к полу.

Для защиты изделия от пыли и грязи и для борьбы с неизбежной грязью при шлифовке полезно принять следующие меры: стены и потолок комнаты окрасить светлой масляной краской (слой глищевый, легко промываемый), полы иметь крашеные без щелей, а под столом дополнительно постелить кусок линолеума, стол окрасить эмалевой краской, иметь в комнате водонепроницаемый коврик с фаянсовой раковиной, щели у окон заклеить бумагой, форточкой во время работы не пользоваться и, вообще, не допускать сквозняка.

Приобретем два стеклянных диска одинаковых, например, размеров и используем первый диск (А) для изготовления из него зеркала, а второй диск (В) в качестве шлифовальника.

Такие диски можно подобрать среди корабельных иллюминационных стекол; их диаметр может достигать  $\sim 300$  мм, а толщина  $\sim 40$  мм. Предположим, что мы приобрели два таких стекла диаметра 155 мм и толщины 20 мм и собираемся изготовить 6-дюймовое вогнутое зеркало для любительского телескопа.

Диск *B* мы накладываем на шлифовальный стол *C* (рис. 36) на три резиновые пробки (*a*) и укрепляем его от смещения и проворачивания тремя корковыми пробками (*b*), привинченными шурупами к верхней доске стола; при таком устройстве, мы уже знаем, диск *B* окажется правильно разгруженным и не будет испытывать чрезмерных и произвольных деформаций.

Далее мы смажем поверхность диска *B* кашицей из крупнозернистого абразива и воды и наложим на диск *B* диск *A* — наше будущее зеркало. Захватив пальцами обеих рук диск *A*, начнем двигать его возвратно-поступательно по поверхности диска *B*, постепенно поворачивая в руках и медленно перемещаясь вместе с ним вокруг стола; мы начали таким образом грубую шлифовку зеркала.

Каждое возвратно-поступательное движение *A* по *B* соответствует одному штриху и совершается со скоростью приблизительно одного штриха в секунду. Штрих имеет таким образом длину, форму и направление траектории и частоту.

Проворачивание диска *A* вокруг осп, необходимое для получения точной поверхности вращения, совершается со скоростью одного оборота приблизительно за 20—30 с. Наконец, хождение (вращение) мастера вокруг стола, обеспечивающее равномерный по азимутам износ шлифовальника *B*, совершается приблизительно со скоростью 1 об./мин.

Если принять, что мастер ходит вокруг стола по кругу с радиусом 60 см, то за 8 часов такой работы он, практически толчася на месте, совершит приблизительно двухкилометровую прогулку; если принять длину штриха равной  $\frac{1}{2}$  диаметра диска, то за тот же 8-часовой рабочий день мастер преодолеет силы трения между дисками *A* и *B* на пути, длиной около 3 км. Силы трения не постоянны и возрастают по мере подсыхания воды: они особенно велики при тонкой шлифовке и при полировке, когда между двумя обрабатываемыми поверхностями имеет место значительное «присасывание».

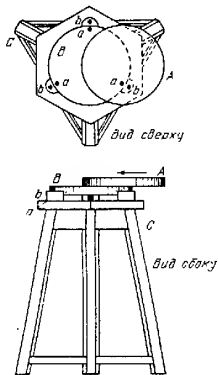


Рис. 36.

Поэтому двухкилометровый мощный для ног и трехкилометровый для рук не может быть отнесен к числу легких. После такой напряженной прогулки прежде всего и сильнее всего болит поясница, так как работа производится в полусогнутом положении.

Оптик-любитель может утешать себя мыслью, что все в мире относительно, а потому его вращение вокруг стола равносильно тому, как если бы стол вращался вокруг своей оси с той же угловой скоростью, но в обратном направлении. Оптик-профессионал ощущает реально такое облегчение работы, имея перед собой шлифовальную машину с вращающимся вертикальным шпинделем, на столе которого вращается изделие или шлифовальный диск; кроме того, машина механически выполняет перемещение изделия по шлифовальнику с необходимой скоростью и при штрихе заданной длины, формы и направления; оптику остается только подмазывать время от времени абразивную кашицу или полирующую суспензию, останавливать и включать машину, протирать и исследовать изделие и управлять процессом в нужном направлении.

Длину, форму и направление штриха мы будем выражать траекторией, которую опишет центр верхнего диска  $A$  при своем движении по поверхности диска  $B$ . Самым простым штрихом будет прямолинейный штрих через центр диска  $B$  (рис. 37); назвав буквой  $l$  — длину штриха и буквой  $D$  — диаметр диска, будем характеризовать длину штриха отношением  $l:D$ .

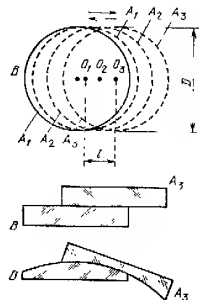


Рис. 37.

Диск  $A$  и его центр  $O$  принимают за время одного штриха ряд последовательных положений:  $A_1(O_1)$ ,  $A_2(O_2)$ ,  $A_3(O_3)$ ,  $A_2(O_2)$  и снова  $A_1(O_1)$ . Крайние положения  $A_1$  и  $A_3$  являются «мертвыми точками» при таком движении. Очень часто стараются вести обработку так, чтобы при положении  $A_1$  центры зеркала и шлифовальника совпадали; в этом случае штрих направлен в одну сторону от центра нижнего диска, а вынос зеркала за край шлифовальника равен длине штриха.

Нетрудно видеть, что при любой форме штриха, по мере сползания диска  $A$  с поверхности диска  $B$ , давление от собственного веса, усиленное давлением рук шлифовщика, вызывает более быстрое срабатывание у диска  $A$  — в центральной области, а у диска  $B$  — на краю. В результате с течением времени шлифовки у плоских дисков появляется и постепенно нарастает кривизна: верхний диск становится вогнутым, а нижний выпуклым, как это показано внизу рис. 37. Оптик должен в нужный момент приостановить грубую шлифовку с учетом, что и при дальнейшей тонкой шлифовке кривизна поверхностей будет расти,

хотя и в значительно меньшей степени. Если кривизна шлифуемых поверхностей оказалась больше требуемой, то оптику следует обменять местами диски *A* и *B* и шлифовать шлифовальником *B* по неподвижному зеркалу *A*.

Чрезмерно длинный штрих, или штрих в обе стороны от центра шлифовальника (вынос зеркала в одну и другую сторону), или штрих непрямолинейный в форме кругов, петель и «восьмерок» способствуют заваливанию поверхности на внешней зоне; эта ошибка формы поверхности называется у оптиков *завалом края* и, если она появляется, с ней довольно трудно и долго приходится бороться.

Поэтому наиболее рациональным штрихом является штрих прямолинейный, с выносом зеркала в одну сторону от шлифовальника (обычно в сторону мастера) и с длиной  $l:D$  от  $1/4$  до  $1/2$ .

Рассуждая теоретически, две притираемые друг к другу поверхности должны оказаться сферическими и одинаковой кривизны — одна выпуклой и другая вогнутой формы. В действительности это не так, и две отшлифованные одна на другой поверхности приобретают форму, изображенную в утрированном виде на рис. 38. Очистившие от паждака поверхности соприкасаются на некоторой зоне *c*, тогда как в центральной области *a* и на внешней зоне *b* между поверхностями оказывается просвет, обычно меньший размера зерна шлифующего абразива. Такая форма получается, как было указано, благодаря более интенсивному срабатыванию диска *A* — вблизи центра и диска *B* — на внешней зоне и момент наибольшего выноса, а потому зерна абразива сосредоточиваются в областях *a* и *b* и производят в этих местах более интенсивную шлифовку на каждой из поверхностей; в то же время вблизи зоны *c* абразивным зернам негде скопиться и удержаться, они здесь скорее измельчаются и вытесняются, а поверхности медленнее срабатываются.

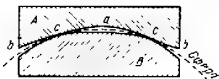


Рис. 38.

Нужно очень неумело шлифовать диск по диску, применяя большой вынос и оказывая сильное дополнительное давление в момент наибольшего выноса, чтобы получить в областях *a* и *b* взаимное отклонение двух поверхностей, превышающее величину зерна абразива. Обыкновенно это отклонение измеряется малой долей размера зерна, а потому, когда опытный оптик заканчивает шлифовку 240-минутным паждаком и длительно, почти без дополнительного давления, растирает между поверхностями последнюю порцию паждака — размеры шлифующих зерен, по-видимому, уменьшаются до 3—4 микронетров, а отклонения поверхностей от сферы (прерывистая линия рис. 38) измеряются малыми долями мкм.

Недаром существует довольно распространенное и обоснованное мнение, что поверхности изделия приобретают точную сферич-

ческую форму во время их тонкой шлифовки, хотя бы и не контролируемой, но выполняемой достаточно опытным мастером, и что такая же бесконтрольная полировка, даже в руках опытного мастера, способна резко искажать правильность сферической формы поверхностей.

Для удобства манипулирования с зеркалом во время шлифовки большинство авторов рекомендует приклеивать к зеркалу, с помощью пара или мягкой полировочной смолы, деревянную ручку, как это изображено на рис. 39. Но я бы не рекомендовал пользоваться таким опасным комфортом.

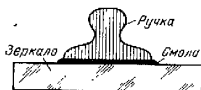


Рис. 39.

Дело в том, что для прочной приклейки нужно производить ее в горячем состоянии, т. е. деформировать и ручку и зеркало; текучесть смолы по безграфикно велика, и хотя напряжения в смоле, а вместе с тем и деформации

зеркала, постепенно освобождаются, но на это всегда требуется достаточное время; кроме того, деревянная ручка гигроскопична и имеет слоистое строение, а потому набухает от влаги и деформируется; эффект будет уменьшен, если ручку выточить из дерева в торец (волокна дерева параллельны оси ручки), а затем просушить ее и защитить от влаги окраской или парафинированием. Уж если и пользоваться ручкой, то никак не деревянной, а либо пластмассовой, либо металлической, но и в этом случае различие коэффициентов расширения материала ручки и стекла могут вызывать деформации зеркала при переменах температуры. У нас никогда нет полной уверенности, что зеркало с наклеенной и с отклепной ручкой будет иметь одну и ту же форму поверхности с оптической точностью, а потому не лучше ли вообще отказаться от ручки?

Даже зеркало с диаметром 300 мм не так уж трудно удерживать в руках, снимать и снова накладывать на шлифовальный. Соглашаясь на некоторые осложнения и неудобства при обработке зеркала без наклеенной на него ручки, мы по крайней мере спокойны, что после отстойки наблюдаем истинную форму поверхности зеркала, какой она останется и в дальнейшем. Чтобы зеркало не слишком сильно нагревалось от рук на внешней зоне, полезно при тонкой шлифовке и полировке надевать на руки шерстяные или резиновые перчатки; если же это нас стесняет, то отказаться от перчаток и давать зеркалу достаточно долго отстояться, т. е. принять во всей своей массе однообразную температуру. При малых и средних размерах зеркала необходимое время отстойки сравнительно невелико и не отстойка будет в основном тормозить работу и определять ее сроки.

Нанеся между поверхностями свежую порцию абразивной кашицы и поработав минуты две-три, мы заметим, что громкий «хруст» абразива постепенно сменяется умеренным «шипением». Это значит, что зерна абразива достаточно измельчились

и что к ним добавилось значительное количество разрушенного стекла; такая кашица еще продолжает шлифовать стекло, однако делает это очень непроизводительно и медленно, а потому следует смыть губкой с обеих поверхностей отработавшую порцию абразива вместе с измельченным стеклом и подсыпать или подмазать свежую порцию абразива.

При тонкой шлифовке наблюдается едва слышное шипение; поверхности сильно присасываются друг к другу, измельчение зерен, благодаря их большому числу, идет медленнее, а интервалы между добавками свежих порций абразива возрастают. При тонкой шлифовке не рекомендуется снимать зеркало со шлифовальника и промывать их перед нанесением повторных свежих порций абразива: лучше потерять в производительности процесса, чем рисковать лишний раз исцарапать поверхность зеркала; поэтому во время тонкой шлифовки зеркало только слегка сдвигается со шлифовальника (на величину штриха), и на оголившуюся поверхность шлифовальника подмазывается кисточкой свежая порция абразивной кашицы данного помера. При тонкой шлифовке абразивная суспензия довольно быстро подсыхает, так как она располагается очень тонким слоем, а присасывание изделия к шлифовальнику способствует повышению температуры (особенно это относится к процессу полировки). Поэтому время от времени мы увлажняем шлифующий слой, подмазывая кисточкой только одну воду. Из тех же соображений для тонкой шлифовки и полировки желательна влажная атмосфера помещения, осуществляемая путем развешивания мокрых простынь или частого протирания пола мокрой тряпкой; высокая влажность помещения благоприятна, кроме того, для очищения воздуха от пыли.

При окончательной тонкой шлифовке применяются самые малые удельные давления. В случае оптики среднего размера никаких дополнительных догрузок к собственному весу зеркала добавлять не следует; при крупной оптике, имеющей значительную толщину, удельное давление от собственного веса может оказаться больше допустимого, а потому приходится применять приспособления, разгружающие часть веса зеркала. Возвращаясь к ручной тонкой шлифовке, мы можем сказать, что при ней следует только толкать зеркало в направлении штриха и скорее стараться оторвать зеркало от шлифовальника, чем нажимать на него в направлении сверху вниз.

Шлифовка данным помером наждака закончена, когда не только снят слой предыдущего более грубого мата, но и подслоя поврежденного трещинами стекла. В первом мы убеждаемся, вооружившись достаточно сильной лупой и наблюдая, кроме того, матовую поверхность в скользящем свете, когда она, при угле падения, достаточно близком к  $90^\circ$ , начинает отражать предметы однообразно по всей поверхности; для удаления же поврежденного подслоя необходимо, очевидно, несколько продолжить время шлифовки, руководствуясь личным опытом.

Если во время шлифовки поверхность не приобрела сферической формы и обладает зональными ошибками, то после достаточной расшлифовки данным номером наждака с подмазкой водой более тонкий и нежный мат образуется на зоне с (см. рис. 38), тогда как на участках *a* и *b* мат будет более грубым; может быть мы и не обнаружим существенного различия этих участков, наблюдая поверхность с помощью лупы, но при скользящем свете, при некотором угле падения, зона с начнет отражать предметы, тогда как остальные участки поверхности, при том же угле падения, представятся нам матовыми.

Об измерении радиуса кривизны поверхности, а также об исследовании формы поверхности, будет сказано в дальнейших главах книги.

Закончив тонкую шлифовку, мы переходим к полировке поверхности зеркала, т. е. к приданию ей предельно совершенной гладкости, независимо пока от геометрической формы поверхности.

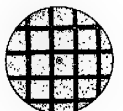
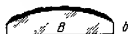


Рис. 40.

В качестве основы для полировальника используем диск *B* — наш бывший шлифовальник.

Расплавим в котелке пек и канфоль в нужном соотношении, хорошо размешаем эту жидкую черную массу, имеющую густоту сметаны; процедим ее в другую посудину через сито из нескольких слоев марли и еще раз хорошо размешаем деревянной или стеклянной палочкой. Затем выльем на слегка подогретый с поверхности диск *B* (рис. 40, *a*) количество смолы, достаточное, чтобы образовать слой около 2—4 мм толщины. Под действием силы тяжести эта горка смолы довольно быстро растекается по поверхности диска, а потому, не теряя времени, мы разравниваем по поверхности смолу мокрым пальцем или куском мокрой ремешной кожи, предупреждая стекание смолы за края диска (рис. 40, *b*). Когда температура смолы достаточно понизится, а вязкость возрастет, увлажняем поверхность смолы водой или суспензией крокуса в воде, нанося ее кисточкой и потом накладываем на смолу зеркало *A* и формует смолу, двигая зеркало в различных направлениях, как при шлифовке (рис. 40, *c*); воду или крокус с водой, препятствующие при-

клеиванию зеркала к теплой смоле, лучше нанести не на смолу, а непосредственно на поверхность зеркала *A*; во время формовки поверхность смолы достаточно хорошо, хотя и с отдельными пропусками, воспроизведет отпечаток поверхности зеркала, а избыток смолы выдавится за края полировальника и будет в дальнейшем отбит ножом или стамеской, когда смола остынет и затвердеет. Но мы не будем ждать остывания смолы, а вооружимся деревянной линейкой *M* (рис. 40, *d*), обильно смоченной водой, и нанесем

на еще не затвердевшей смоле ряд продольных и поперечных капавок, расчленяющих полировальник на отдельные квадратики и позволяющих смоле быстрее приспособляться к форме поверхности зеркала, а крокусу и воде проникать к центральным областям полировальника во время полировки.

Естественно, что при выдавливании желобков смола несколько выпятится возле них, а ее поверхность деформируется и не будет хорошо прилегать к поверхности зеркала; поэтому, нанеся продольные капавки, затем поперечные, затем повторив выдавливание продольных и поперечных капавок (рис. 40, с), мы снова формируем поверхность полировальника, двигая по нему зеркало А, как было пояснено выше.

Такую операцию следует повторять до тех пор, пока температура и вязкость смолы еще позволяют ее деформировать, правда, при все возрастающих усилиях.

В конечном счете у опытного мастера полировальник принимает вид, изображенный на рис. 40, е: смола расчленена взаимноперпендикулярными желобками на квадратики, представляющие точный слепок с поверхности зеркала; не страшно, если у отдельных квадратиков имеются небольшие дефектные углубленные участки: в процессе полировки текучая смола будет постепенно заплывать, стремясь всеми точками прилипнуть к поверхности зеркала; скоро эти дефектные участки исчезнут, начнут заплывать и желобки, и мы не один еще раз будем выпущены подрезать пожар заплывающие желобки.

Существенно важно, чтобы центр полировальника, отмеченный кружком на рис. 40, е, не пришелся в центре среднего квадратика или на пересечении двух желобков: полировальник должен быть расчленен желобками несимметрично, так как в противном случае полируемая на нем поверхность зеркала приобретет ряд кольцевых (зональных) ошибок.

Для полировки зеркала наносим на полировальник кисточкой небольшое количество крокуса, взвешенного в воде, накладываем на полировальник зеркало и производим те же движения, что и описанные нами при шлифовке. И здесь неизбежно хождение вокруг стола и желателен прямолинейный штрих не слишком длинный и не слишком короткий.

После нескольких минут полировки поверхность зеркала начинает слабо отражать предметы не только при скользящем, но и при нормальном падении лучей, а после нескольких часов работы (у начинающих любителей это могут быть десятки часов) зеркало оказывается вполне отполированным. Теперь ни в сильную лупу, ни даже в сильный микроскоп (по не в ультрамикроскоп), не видно никаких следов мата и ячеек шлифовки: поверхность оказывается безусловно гладкой.

Часто крокус бывает недостаточно тонко отмучен или чем-либо засорен, или смола оказывается слишком твердой для данной температуры, или к началу повторной полировки полировальник за время своего отдыха успел заметно деформироваться, не



прилегая всеми точками полирующего слоя к поверхности зеркала; в результате на зеркальной поверхности появляется множество мелких царапин, покрывающих, как паутина, большие участки зеркала, а часто и все зеркало. Мелчайшие из этих царапин (так называемые «крокусные царапины») почти не видны в лупу в проходящем свете и обнаруживаются по дифракционному свечению в отраженном ярком свете; эти царапины, благодаря своей малости, не опасны и быстро исчезают после того, как полировальник в работе несколько разогреется и лучше прилипает к стеклу. Более крупные царапины очень неприятны, так как уважающий себя оптик не хочет выпустить изделие с царапинами, которые, может быть, и не вредят качеству изображения, но несомненно являются нарушением эстетики; на сполірування же таких царапин уходит слишком много времени. Наконец, при достаточном крупных царапинах никакая полировка не поможет, и нам следует возвратиться к тонкой, а иногда и к средней шлифовке.

Чтобы это случалось как можно реже и в возможно меньшей степени, следует: дополнительно самому отмучивать крокус; хранить его вместе с водой в чистой широкогорлой банке с корковой пробкой (а не притертой стеклянной); снимать кисточкой только верхний слой крокуса из банки; перед каждым началом полировки и после подрезок полировальника слегка подогревать полировальник и, положив на него смазанное крокусом зеркало, выкидать несколько минут, пока зеркало своим весом не отпрессует частично полировальника и не осадит на более низкий уровень случайно выступившие одиночные точки на поверхности смолы.

В процессе полировки оптик систематически контролирует кривизну и форму изготавливаемой поверхности способами, которые будут описаны ниже. Здесь же мы рассмотрим вопрос, каким образом оптик может вмешиваться в процесс полировки и изменять у изделия по своему усмотрению и кривизну и форму поверхности. В случае полировки этот вопрос решается иначе и значительно разнообразнее, чем в случае шлифовки.

Начнем с изменения кривизны полируемой поверхности, отвлекаясь пока от ее геометрической формы, а для большей наглядности рассмотрим случай полировки поверхности нулевой кривизны, т. е. плоскости. Возьмем (рис. 41, а) полировальник В заведомо большего диаметра по сравнению с изделием А, и в этом случае ясно, что будет ли зеркало сверху или снизу полировальника, оно рано или поздно приобретет выпуклую, а полировальник — вогнутую форму. В обратном случае (рис. 41, б) и результат получится обратный. Поэтому для поддержания неизменной кривизны у полируемой поверхности следует брать полировальник приблизительно такого же диаметра, как у полируемой поверхности: для случая полировки «зеркало вверх» — преувеличивая лишь на несколько процентов диаметр полировальника, а для случая полировки «зеркало вниз» — настолько же

его пренебрегая, чтобы устранить рассмотренный выше эффект давления от собственного веса и внешней нагрузки.

Но во всех случаях, когда диаметры зеркала и полировальника отличаются друг от друга, не удастся простыми способами получить точной сферической формы поверхности без зональной

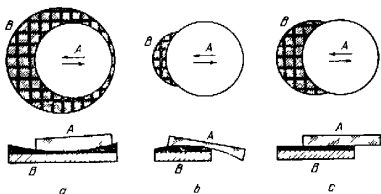


Рис. 41.

ошибки на краю, и такой ошибкой в обоих случаях, как это ни странно, будет завал края.

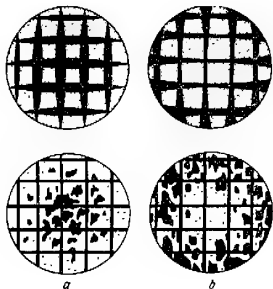
Действительно, в случае, изображенном на рис. 41, а, центральная область полировальника сильнее разогревается, размягчается и оседает на более низкий уровень, тогда как на внешней зоне смола оказывается более твердой, а потому, когда к ней приближается край зеркала А, обработка внешней зоны зеркала происходит более интенсивно, и излишне спятое стекло приводит здесь к завалу края поверхности. С другой стороны, в случае, изображенном на рис. 41, б, полировальник обрабатывает преимущественно центральные участки зеркала А, обработка же края зеркала, лишь изредка соприкасающегося с полировальником, явно отстает, и здесь также получается завал, только иного происхождения: в первом случае завал образовался от избытка, а во втором от недостатка обработки.

Так как в нашем распоряжении имеются и другие способы воздействия на кривизну, то будем рекомендовать в качестве наиболее рационального полировальника полировальник одинакового с изделием диаметра (рис. 41, в). Если такой полировальник и будет изменять свою кривизну и кривизну полируемого изделия, то лишь в самой незначительной степени. На фоне этих небольших возможных изменений кривизны мы можем осуществить значительный эффект изменения кривизны, применяя тот или другой способ подрезки полировальника.

На рис. 42 показаны различные виды подрезки смолы полировальника: а — с ослабленным центром и б — с ослабленным краем. Верхние картинки рисунка соответствуют приему подрезки, при котором постепенно изменяется ширина канавок, увеличиваясь от края к центру или наоборот, а вместе с тем изменяется и рабочая поверхность квадратиков полировальника; нижние

картинки изображают более простой прием подрезки того же назначения, осуществляемый путем выскабливания или высекания ножом отдельных небольших участков на квадратиках, изменяющих по желательному для нас закону рабочую поверхность полировальника в зависимости от радиуса зоны.

Работая на таких полировальниках, как на рис. 42, а, мы, естественно, будем производить больший сьем стекла на внешних зонах зеркала, и если последнее было плоским, то после такой обработки оно станет выпуклым; таким же образом полировальники, изображенные на рис. 42, б, позволят углубить центральную область зеркала, превратив плоскую поверхность в вогнутую.



а

б

Рис. 42.

Если исходная поверхность зеркала обладает некоторой кривизной, то при полировке на таких полировальниках кривизна будет изменяться в ту или иную сторону в зависимости от знака кривизны и типа а или б подрезки полировальника.

Нужно только помнить, что полировальники типа а, имеющие большую поверхность и большую сопротивляемость на

внешней зоне, могут привести к «подвернутому краю» у изделия; а чтобы этого не случилось, необходимо применять штрих длиннее нормального и тем самым более интенсивно разогреть внешнюю зону полировальника, заставляя ее легче деформироваться и меньше «присасываться» к зеркалу в положении первой мертвой точки (см. рис. 37); полезно даже несколько переводить зеркало за край полировальника в первой мертвой точке, т. е. работать при двухстороннем выносе зеркала за край полировальника.

Полировальник типа б обладает обратной тенденцией: он стремится углубить центральную часть зеркала своими центральными ослабленными квадратиками, обработка же зеркала на внешней зоне выполняется медленнее, чем мы рассчитывали, и поверхность приобретает «запал на краю». Поэтому при работе на полировальниках типа б следует применять штрих короче нормального, с выносом только в одну сторону, без сильной добавочной нагрузки.

Теперь легко перейти к вопросу об изменении формы поверхности изделия.

Допустим, что, в общем, сферическая поверхность зеркала обладает некоторым числом сравнительно мелких зональных ошибок, происшедших, например, из-за недостаточно однородного состава смолы или из-за неотформованных бугорков и выступов на

смоле после ее подрезки. В этом случае прямолинейный штрих через центр следует заменить каким-либо другим штрихом, при котором отдельные более энергичные точки полировальника не будут выскабливать одних и тех же зон зеркала. Наилучшим для этого случая штрихом будет штрих также прямолинейный, но проходящий не строго через центр полировальника, а периодически смещаемый с центра в одну сторону. На рис. 43, а (вверху) показан прямолинейный штрих через центр с выносом в одну сторону (в сторону мастера) в виде траектории центра зеркала на поверхности полировальника; это обычный «пормальный» штрих, который рекомендовался до сих пор. Для сглаживания же зональных ошибок мы рекомендуем штрих, изображенный на рис. 43, б (вверху) и представляющий собой зигзагообразную линию, постепенно удаляющуюся всегда в одну сторону (например влево) от центра  $O$ , а затем снова к нему приближающуюся. Так

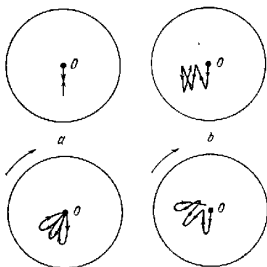


Рис. 43.

как в действительности мастер совершает «хождение» вокруг стола, указанное на рисунке стрелкой, то истинные траектории центра зеркала в пространстве за некоторую долю оборота вокруг стола представляют собою фигуры, изображенные в нижней части рис. 43.

Таким способом удастся, если не вполне уничтожить, то значительно образом ослабить мелкие зональные ошибки на приблизительно сферической поверхности. Но чаще имеют место значительные, хотя и плавные, зональные ошибки поверхности, выражающиеся в том, что либо край зеркала подвнут (приподнят) (рис. 44, а), либо он завален (рис. 44, б), либо приподнят



Рис. 44.

центральный участок зеркала (рис. 44, с), либо он углублен (рис. 44, d), либо скомбинированы различным образом ошибки края и ошибки центрального участка, например, и край и центр приподняты (рис. 44, e), либо, наконец, ошибка имеет место на какой-нибудь промежуточной между центром и краем зоне зеркала (рис. 44, f). На рис. 44 все изображено для случая плоского зеркала и, конечно, в утрированном виде.

Если такие ошибки невелики, то устранить их можно довольно легко и просто, работая нормальным полировальником с равномерными квадратиками и применяя несколько более длинный штрих для устранения приподнятого края и укороченный штрих для устранения заваленного края; ошибки на зонах и в центральной области могут быть устранены или значительно уменьшены применением зигзагообразного штриха (рис. 43, б).



Рис. 45.

Но если эти ошибки велики, то лучше произвести подрезку полировальника, оставляя более сильными те его зоны, которые должны произвести больший сьем стекла на соответственных зонах зеркала.

Так, например, для исправления поверхности  $f$  (рис. 44) можно предложить полировальники вида, изображенного на рис. 45.

Первый из трех изображенных полировальников не требует пояснений, так как он аналогичен полировальникам на рис. 42.

На втором полировальнике выполнена широкая и глубокая подрезка в виде звездочки. Третий полировальник имеет неглубокую подрезку по спирали с добавлением части второй спирали на желательной для нас зоне. Во всех трех случаях выполнен один и тот же принцип: против углубленной зоны зеркала  $f$  (рис. 44) мы создаем на полировальнике ослабленную зону и ожидаем, что после достаточно продолжительной полировки поверхность зеркала опустится на новый более низкий уровень, а углубленная зона исчезнет. Если таким полировальником работать дольше, чем это нужно для устранения углубленной зоны, то, естественно, вместо нее появится, как бы наростет, возвышенная зона, которую пришлось бы удалить аналогичными полировальниками, но имеющими негативные свойства по отношению к свойствам полировальников, изображенные на рис. 45.

Подрезка по спирали, выполняемая ножом на полировальнике во время его вращения на шпинделе оптического станка, обладает тем преимуществом, что неглубокая спиральная канавка сравнительно легко и быстро заплывает во время полировки; возобновить же ее или видоизменить ее форму не представляется трудным; поэтому оптик часто повторяет подрезку полировальника по спирали, ослабляя или усиливая те зоны, которые ему подсказывает чутье и опыт в работе. Восстановить нарушенную форму квадратиков, а затем ее видоизменить в нужном направ-

лении, представляется делом значительно более трудным и длительным, так как борозды между квадратиками широки и глубоки.

Я применяю выдавливание на полировальнике квадратных ячеек только для удобства его формовки, а затем даю бороздам постепенно заплывать и в дальнейшем о них больше не забочусь, осуществляя ту же подрезку путем срабатывания поверхности полировальника в отдельных местах и по отдельным линиям и действуя острым лезвием пока вблизи его кончика.

Мы весьма примитивно объяснили влияние подрезки полировальника на форму полируемой поверхности: отдельные зоны полировальника усилены или ослаблены, а потому и пропихивает большее или меньшее срабатывание на соответственных зонах изделия. В действительности это не совсем так и, во всяком случае, совсем не так просто объясняется.

Даже весьма текучая смола за время одного штриха не успевает вполне приспособиться к несферической форме поверхности изделия. Поэтому, у полировальника и у изделия всегда имеется тенденция поддерживать, в пределах упругих деформаций, сферическую форму поверхности и притом одинаковой кривизны, т. е. взаимно приспосабливаться всеми точками при любых перемещениях одной поверхности по другой. И я утверждаю, что к концу достаточно продолжительной полировки, даже при неравномерно подрезанном полировальнике, и полировальник и изделие имеют достаточно правильную сферическую форму.

Но не следует забывать о тепловом расширении тел: зона изделия, преимущественно подвергающаяся обработке за счет неослабленной зоны полировальника, неизбежно приобретает и более высокую температуру; выпячиваясь выше общего сферического уровня, она получает возможность оказаться сполитрованной в первую очередь и т. д. Но вот мы прекратили полировку и поставили изделие на штит в установку для исследования. Охлаждающееся изделие, рано или поздно, принимает равномерную температуру, и зоны, сильнее разогретые предшествовавшей полировкой, оседают на более низкий уровень. Отсюда мы делаем формально правильное заключение, что более мощные зоны полировальника произвели большее срабатывание на соответствующих зонах изделия.

Но правильное было бы искать различия не в механическом режиме, а в температурном режиме полировки. Таким же образом следует объяснить влияние и размеров полировальника, и длины штриха, и охлаждения от подмазки суспензии, и воздушной вентиляции внешних зон изделия.

Учитывая температуропроводность и тепловое расширение различных материалов, можно объяснить и подтвердить опытом, почему в процессе полировки сравнительно легко придать асферическую форму стеклянному зеркалу, труднее зеркалу из пирокса и, наконец, весьма трудно металлическому зеркалу.

Если можно исправить ошибки плохого сферического зеркала и превратить его поверхность в точную сферу, то, очевидно, ана-

логичными способами можно и сферическую поверхность превратить в асферическую заданной формы. Полировальник, являющийся по своей форме «противоестественным» для получения точной сферы, окажется естественным для получения некоторой асферической поверхности, и наоборот.

Перейдем к описанию машинной обработки крупной астрономической оптики, а для конкретности и простоты изложения рассмотрим от начала до конца, например, случай обработки большого вогнутого сферического зеркала для менискового телескопа. Тому, кто усвоит этот процесс применительно к вогнутому зеркалу, нетрудно будет представить себе, как изготавливаются линзы для крупных объективов, мениски для менисковых телескопов, крупные объективные призмы и т. д.

Предположим, что нам задано изготовить вогнутое сферическое зеркало из пирекса (рис. 46), у которого диаметр  $D = 1000$  мм и радиус кривизны зеркальной поверхности  $R = 5000$  мм; в центре зеркала должно быть круглое

отверстие (дыра) с диаметром  $\varnothing_1 = 150$  мм; задняя поверхность зеркала приблизительно плоская, обод зеркала цилиндрический; со стороны лицевой поверхности должна быть плоская фаска шириной 15 мм, тогда как с задней стороны защитные фаски (под углом  $\sim 45^\circ$ ) могут иметь произвольный размер, однако не меньше 5 мм.

Сразу же определяем, что полный диаметр готового изделия будет:

$$\varnothing = 1000 + 2 \cdot 15 = 1030 \text{ мм.}$$

Допустим, что по некоторым соображениям мы решили разгрузить зеркало в оправе телескопа на 15 точек (см. рис. 21). Тогда, предполагая вместо вогнутого зеркала с центральным отверстием сплошной плоскопараллельный диск, находим из выражения (60), приведенного в единице, и для  $C_{15} = 3,5 \cdot 10^4$  следующее значение толщины зеркала:

$$l_{\text{min}} = 108 \text{ мм.}$$

В действительности, кривизна зеркала и центральная дыра облегчат вес и улучшат условия разгрузки зеркала, а потому мы остановимся на толщине зеркала  $l = 108$  мм.

Установив небольшие припуски на обработку, мы можем заказать заводу оптического стекла пирексовый тонкоотожженный диск с диаметром  $\varnothing + \Delta\varnothing = 1050^{+20}_{-0}$  и с толщиной  $l + \Delta l = 118^{+10}_{-0}$ ; при этом мы сознательно оставляем для себя припуски на обработку: для диаметра 20 мм и для толщины 10 мм. Эти припуски нам во всяком случае придется удалить при обработке изделия, но, кроме того, мы даем для завода верхние допуски: для диаметра +20 мм и для толщины +10 мм, а потому в худшем случае

нам, может быть, придется удалить и вдвое большую против наших предположений массу стекла, если завод оптического стекла выполнит заготовку при «верхних допусках».

Подсчитаем величину стрелки ( $x$ ) зеркала, а также объем ( $v$ ) и вес ( $p$ ) сферического сегмента, который нам придется сошлифовать независимо от припусков и допусков на диаметр и толщину.

Очевидно, что

$$\left. \begin{aligned} x &= R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}} \approx 25 \text{ мм}, \\ v &= \pi x^2 \left( R - \frac{x}{3} \right) \approx 9800 \text{ см}^3, \\ p &= v d \approx 22 \text{ кг}. \end{aligned} \right\} \quad (83)$$

Поэтому вес  $P$  готового зеркала окажется равным весу диска  $\varnothing = 1030$  мм и  $l = 108$  мм за вычетом веса сферического сегмента и веса удаленного цилиндрического столбика  $\varnothing_1 = 150$  мм и  $l_1 = l - x = 83$  мм, т. е. без учета веса снимаемых защитных фасок:

$$P = \pi d \left[ \frac{\varnothing^2 l}{4} - x^2 \left( R - \frac{x}{3} \right) - \frac{\varnothing_1^2 (l - x)}{4} \right] \approx 177 \text{ кг}. \quad (84)$$

Если завод оптического стекла сдаст заготовку стекла при верхних допусках, т. е. при  $\varnothing + \Delta\varnothing = 1070$  мм и при  $l + \Delta l = 128$  мм, то в процессе холодной обработки нам придется удалить в общей сложности 82 кг стекла; если же заготовка будет сдана при нижних допусках, то нам придется удалить только 53 кг; а так как вес сферического сегмента вместе с весом столбика центрального отверстия составляют 25 кг, то припущенный нами припуск на обработку заставит нас сошлифовать лишних 28 кг стекла.

Сошлифовка десятков килограммов стекла представляет собой очень длительную и трудоемкую операцию, требующую, кроме того, большого расхода мощности и абразивов и невероятно засоряющую производственное помещение, как бы мы ни стремились поддерживать в нем чистоту. Поэтому следует по возможности сокращать припуски и суживать допуски до тех пор, пока мы уверены, что примененная нами технология позволит получить изделие без внешних дефектов и изъянов и пока не запротестует в самой категорической форме против чрезмерно жестких допусков завод оптического стекла.

Наиболее желательной и выгодной для нас формой заготовки была бы заготовка в виде плоскоогнутой липы с минимальными припусками. Такую заготовку можно получить путем моллирования стекла в соответственной моллировочной форме; пусть при этом мы переплатим заводу за изготовление заготовки, зато такой расход с лихвой окупится при холодной обработке зеркала.



Попадывая к нам заготовка последовательно проходит следующие этапы обработки.

1. **Обработка нижней поверхности** (рис. 47). Заготовка *A* укладывается своей будущей лицевой поверхностью на стол *B* медленно вращающегося станка простейшего типа (например, вертикальный шпиндель *C* с соответственным приводом). Ничем, кроме сил трения, заготовка на столе не удерживается; никакого разгрузочного приспособления для стола не требуется. Число оборотов шпинделя для 1-метрового зеркала 1—2 в минуту; в этом смысле вместо ремешной передачи, изображенной схематически на рис. 47 (*D*), было бы более рационально применить червячную передачу, просто разрешающую задачу получения малого числа оборотов. Станина станка и конструкция подшипников *M* и *N* на рисунке не показаны.

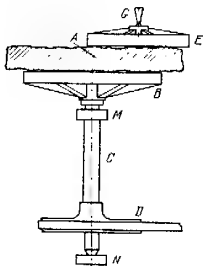


Рис. 47.

Планишайбы (около 600 мм) оказываются вполне достаточным для нашего случая. Планишайба приводится в возвратно-поступательное движение с помощью поводка *G*, работающего от отдельного привода, не показанного на рисунке; число штрихов в минуту около 20—30; направление, длина штриха и вынос планишайбы регулируются. Абразивом служит крупный карбунд (например, № 36 — см. примечание к табл. 16 на с. 96), подсыпaeмый на поверхность диска *A* достаточными порциями и смачиваемый водой.

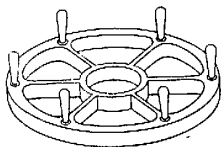


Рис. 48.

Ту же операцию можно с успехом выполнять и вручную, отказавшись от поводкового механизма, но в этом случае предпочтительнее изготовить планишайбу *E* из алюминиевого сплава и снабдить ее привертывающимися ручками, как показано на рис. 48.

Если работать, как в нашем случае, шлифовальным уменьшенного размера, то при нормальном штрихе шлифовальник очень скоро приобретет выпуклую, а диск — вогнутую форму поверхности. Чтобы этого не случилось и чтобы обработка происходила сравнительно равномерно по всей поверхности диска, а планишайба равномерно изнашивалась, приблизительно сохраняя свою плоскую форму, следует сильно выносить планишайбу

за край диска, как бы стремясь углубить центр планшайбы и сорвать край диска; и лишь при более тонкой шлифовке следует приблизиться к нормальному режиму шлифовки. Кроме того, следует применять не только длинный штрих, но и значительно смещать его в сторону от центра диска *A*.

Переходя от одного номера абразива к другому мы остановимся, например, на 4- или 15-минутном паждаке, после которого получим достаточно тонко отшлифованную поверхность, сравнительно мало уклоняющуюся от плоскости.

На данной стадии обработки многие остерегаются выполнять слишком тонкую шлифовку задней поверхности диска, так как при дальнейших операциях грубой обработки, требующих пере-  
 кладывания диска, возможно появление грубых царапин на уже обработанной задней поверхности.

Но мы предлагаем ниже такой процесс дальнейшей грубой обработки, при котором достаточно аккуратный оптик относительно застрахован от риска нанесения царапин, а потому, если это желательно, тонкую шлифовку можно продолжать и даже отполировать заднюю поверхность диска. Полировка задней поверхности зеркала ставит ее в одинаковые условия с лицевой поверхностью и допускает ее серебрение или алюминирование, что оказывает некоторое благоприятное влияние в отношении температурных деформаций зеркала.

**2. Кругление края.** Тщательно промываем, вытираем насухо диск и снимаем его со стола станка для перекладки будущей лицевой поверхностью вверх. Для дальнейших операций диск должен быть достаточно прочно связан со столом, а потому наш простейший стол (см. рис. 47) оказывается мало пригодным для работы, если в нем заранее не предусмотрены приспособления, схематически изображенные на рис. 49.

Репристый стол *B* имеет в трех равноудаленных точках навинтованные отверстия, в которые ввинчиваются стержни *a*, заканчивающиеся шаровой поверхностью и несущие на себе небольшие пяточки *b*, воспринимающие в дальнейшем нагрузку веса зеркала *A*; центр тяжести пяточков расположен так, что они висят на шаровых головках в устойчивом равновесии. Схематическая конструкция устройства изображена в нижней части рисунка в более крупном масштабе.

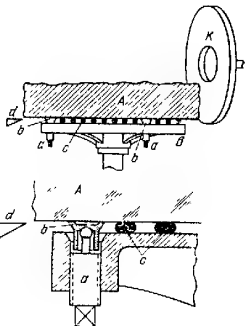


Рис. 49.

Приготовим из достаточно текучей смолы несколько десятков смоляных шариков величиной с вишню, скатав их влажными пальцами на влажной доске пока смола еще теплая; распределим эти «смоляные вишни» *С* приблизительно равномерно по чистой и почти пасухе протертой скипидаром поверхности стола *В*, как показано на рисунке; выдвинем стержни *а* настолько, чтобы пяточки *б* оказались несколько выше уровня смоляных шариков, и наложим на пяточки *б* диск *А* его нижней уже отшлифованной и приблизительно плоской поверхностью.

После этого мы будем производить попеременно две операции: смещать диск параллельно плоскости стола и покачивать его, опуская или приподнимая на соответствующих пяточках *б* при посредстве навинтованных стержней *а*. Цель этих операций состоит, во-первых, в приведении диска *А* в положение, concentрическое со столом и осью вращения, и, во-вторых, в приведении нижней поверхности в положение, перпендикулярное оси вращения шпинделя. Говоря иначе, мы центрируем диск относительно станка, имея опорной поверхностью нижнюю обработанную поверхность зеркала и опорной окружностью обод зеркала, хотя и отступающий от правильной цилиндрической формы, однако не в слишком значительной степени. Некоторый неподвижный индекс *д*, того или иного устройства, позволит выполнить обе эти операции с той или иной точностью; при этом, конечно, стол вместе с диском необходимо привести в медленное вращение. Такой индекс можно, например, приклеить к неподвижному кругу *К*, о котором будет сказано ниже, и подводить его к нижней кромке диска с помощью суппорта, перемещающего круг *К*, наблюдая изменение промежутка между индексом и нижней кромкой во время медленного вращения диска *А*.

После того, как диск *А* таким образом отцентрирован, выкручиваем каждый из трех стержней *а* на одинаковое число оборотов и долей оборота их винтов, т. е. опускаем пяточки *б* на более низкий уровень, параллельный их прежнему уровню. Стержни нужно выкрутить в резьбе настолько, чтобы диск заметно отделился от пяточков и лег на смоляные шарики *с*, на первых порах на небольшое их число. По прошествии нескольких минут, под действием веса зеркала эти шарики из достаточно текучей смолы расплющатся, зеркало начнет медленно опускаться, соприкасаясь с все большим и большим числом шариков и деформируя их и т. д., пока, наконец, зеркало снова не встретит твердой опоры на пяточках *б*, расплющив если не все, то почти все шарики *с*, и прочно прильнув к ним своей нижней поверхностью. Так мы осуществили холодную наклепку диска на стол станка и сохранили достигнутую ранее центровку.

Центровку можно еще раз проверить, и если она нас не удовлетворяет, то подправить ее винтами *а* с расчетом на то, что текучая смола позволит зеркалу осесть в более правильное положение, при котором нижняя поверхность зеркала перпен-

дикулярна оси вращения шпинделя. Конечно, передвинуть в радиальном направлении прочно приклеенное зеркало не так-то легко, и такой повторной центрировочной операции мы производить не будем.

Я изложил процесс несколько более подробно потому, что метод холодной наклейки, предложенный мной и проверенный на практике еще в 1932 г., чрезвычайно полезен при оптической обработке относительно тонких (гибких) изделий.

Итак, зеркало подготовлено к обточке (круглению) его края (обода), и в случае приклеенного зеркала можно заметно увеличить число оборотов шпинделя станка. Для дальнейшей операции можно применить быстро вращающийся от отдельного привода абразивный круг  $K$ , имеющий достаточно крупные и твердые зерна и в то же время хрупкое связующее вещество, облегчающее выкрашивание отработавших зерен и быстрое восстановление абразивной способности поверхности круга.

С таким же успехом вместо абразивного круга можно применить вращающийся металлический (латунный или чугунный) диск, подмазываемый на ходу абразивной пастой.

Так как линейная скорость быстро вращающихся круга или диска в центре равна нулю, а линейная скорость медленно вращающегося изделия очень мала, то центральная область диска или круга почти не будет изнашиваться, и скоро здесь образуется местный бугор, мешающий обработке и получению правильной цилиндрической поверхности у обода зеркала. Поэтому у абразивного круга или у металлического диска  $K$  следует заранее углубить центральную область, как показано на рис. 49, и вести обработку на средних и внешних зонах круга.

Описываемый здесь процесс шлифовки весьма далек от обычной оптической шлифовки и приближается к фрезерованию, так как обработка изделия происходит не по поверхности соприкосновения, а вдоль линии соприкосновения изделия с кругом. Такая шлифовка, даже при удаленной центральной области круга  $K$ , приводит к неравномерному износу его поверхности, а вместе с тем, и к неправильности цилиндрической поверхности обода зеркала. Для управления износом абразивного круга или металлического диска необходим суппорт для вертикального перемещения устройства  $K$  в небольших пределах. Для приближения круга или диска к ободу зеркала и регулирования степени давления и скорости срабатывания необходимо второе движение суппорта в радиальном направлении относительно зеркала  $A$ .

Поэтому, в целом, устройство  $K$  выглядит и работает следующим образом. На кронштейне или отдельном массивном основании смонтирована каретка, допускающая значительные перемещения в радиальном направлении в связи с значительным разнообразием диаметров дисков, подлежащих круглению на данном станке. Эта каретка несет на себе вторую каретку, перемещаемую в умеренных пределах вверх и вниз. На послед-

ней каретке укреплен горизонтальный шпиндель, вращаемый с необходимой для абразивного круга скоростью от отдельного привода с ременной передачей; ось шпинделя направлена на ось вращения станка и к ней перпендикулярна, но может быть в больших пределах смещена в горизонтальной плоскости, заставляя тем самым круг *K* работать не по линии вертикального диаметра, а по боковым хордам. На шпиндель укрепляется абразивный круг или диск, хорошо отцентрированный. Устройство защищено кожухом от проникновения абразивной пыли и грязи к осям и подшипникам шпинделя.

Работа начинается при установленных шпинделях станка и устройства *K*; действуя радиальным суппортом, подводим круг достаточно близко, но не вплотную, к ободу зеркала; приводим станок вместе с зеркалом *A* в медленное вращение от руки, а не от мотора, и за время одного полного оборота наблюдаем изменение просвета между ободом зеркала и кругом *K*; если минимальный просвет не меньше 1 мм, то можно спокойно включить сразу мотор станка, а затем мотор устройства *K*.

Теперь наша машина приведена в рабочее состояние, хотя полезной работы пока не совершает. Начинаем выполнять медленное перемещение радиальным суппортом до тех пор, пока не послышится первых хруст в одной или в двух точках обода зеркала, очевидно, наиболее удаленных от вертикальной оси вращения станка; машина начала совершать полезную работу.

Продолжая осуществлять нажим радиальным суппортом и действуя время от времени суппортом вертикальных перемещений, мы последовательно шлифуем концентрические слои с обода зеркала и поддерживаем у него правильность цилиндрической формы.

К концу кругления произойдет заметный износ абразивного круга или металлического диска, и их поверхности окажутся точно отцентрированными, хотя бы в начале работы нам и не удалось осуществить вполне строгой их центрировки.

Для продолжения кругления и получения более мелкого мата следует либо заменить данный абразивный круг другим более мелким, либо, промыв и очистив металлический диск и зеркало от крупных зерен абразива, продолжить работу, подмазывая следующий более мелкий помер абразива. Новый абразивный круг может оказаться не вполне точно центрированным, тогда как металлический диск за время грубой обточки края автоматически приобрел точную центровку. Теперь понятно, почему оптики предпочитают пользоваться металлическими дисками, а не абразивными кругами, хотя работа в этом случае будет несколько менее производительной, расход абразива — большим, а грязь в помещении — вероятная. Кроме того, металлический диск легко на ходу подрезать в случае значительной неравномерности износа его поверхности; сделать то же самое с абразивным кругом значительно труднее.

Остановимся при круглении на том или ином достаточно малом номере наждака, а если это необходимо, отшлифуем обод зеркала крокусом; в последнем случае работу проще всего выполнить вручную, пользуясь в качестве полировальника деревянным бруском с цилиндрической поверхностью по форме обода зеркала с наклеенным на нее куском войлока или фетра вместо смолы.

**3. Обработка лицевой поверхности.** Удалим устройство *K* (рис. 49) и, не отклеивая зеркала и не нарушая его центрировки, приступаем к обработке лицевой поверхности вначале теми же приемами, которые были описаны для обработки нижней поверхности зеркала. Когда обработка продвинется достаточно далеко и на поверхности появятся значительные отполированные участки, заштрихованные на рис. 50, и когда эти участки приблизятся в нескольких местах к краям зеркала, — измерим с помощью штангенциркуля толщины диска в трех по возможности равноудаленных точках  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$ . Эти три толщины в общем случае не будут равными, а каждая из них будет превышать расчетную толщину  $l = 108$  мм.

Отсчеты штангенциркуля в трех точках сразу же позволяют установить, по какому азимуту диск имеет наибольшую толщину. Таким способом мы определяем величину и ориентировку «клина», подлежащего шлифовке в дальнейшем.

Клин устраняется грубой шлифовкой диска *A* шлифовальником *E* при остановленном шпинделе *C* (см. рис. 47); шлифовальник *E* ориентируют против наиболее толстого места диска и работает с значительным выжимом в этом направлении. Через некоторое время следует привести во вращение шпиндель *C* и непродолжительно поработать на сглаживание поверхности; последнее особенно важно в случае шлифовальников уменьшенного диаметра.

Повторные измерения толщины диска в трех равноудаленных точках позволяют контролировать уменьшение клина, изменение его ориентировки и величину остающегося припуска на толщину. Когда клин станет меньше допустимого, работы при остановленном шпинделе оказываются законченными. Мы выключаем шпиндель и продолжаем нормальную обработку лицевой поверхности крупным абразивом, имея целью уменьшить припуск по толщине до такой величины, которая может быть просто отшлифована в процессе тонкой шлифовки лицевой поверхности; при этом мы предполагаем, что в процессе дальнейшей шлифовки имеется мало оснований для возникновения нового, сколько-нибудь существенного клина: повторные измерения толщины на краю диска убедят нас в этом.



Рис. 50.

После описанных выше обработки задней поверхности, кругления обода и обработки лицевой поверхности, мы получим, в пределах допусков, плоскопараллельный диск заданной толщины, ограниченный цилиндрической поверхностью заданного диаметра и с осью вращения, перпендикулярной к поверхностям диска.

Нам следует выполнить еще три операции по приданию формы изделию:

1) обработать сферическое углубление радиуса  $R = 5000$  мм и диаметра  $D = 1000$  мм на лицевой поверхности; 2) высверлить центральное отверстие диаметра  $\varnothing_1 = 150$  мм; 3) обработать защитные фаски. При малых стрелках кривизны имеется полный смысл изменить последовательность операций, а именно: сперва высверлить дыру и зеркале, а затем обработать вогнутую лицевую поверхность, обеспечив таким образом устранение возможных заколов на поверхности зеркала, получившихся во время его сверления.

Но и при больших стрелках кривизны, как в нашем случае, можно рекомендовать такую же последовательность по следующим причинам: во-первых, высверлить узкое кольцо диаметром 150 мм на глубину 25 мм легче, чем шлифовать соответствующий объем стекла; во-вторых, заколы при сверлении часто бывают довольно глубокими, а потому лучше застраховать себя от них толстым сегментом стекла, которое в дальнейшем будет сошлифовано, чем вести работу по сверлению излишне осторожно и медленно, опасаясь заколов и все равно оставляя у зеркала на вогнутой поверхности некоторый припуск по толщине, а потому возвращаясь к шлифовке этого припуска.

Вот почему следующей нашей операцией будет:

4. Сверление дыры. Не смещая диска  $A$  в установке (рис. 49), укрепляем над лицевой поверхностью диска и приблизительно вдоль его диаметра подручник в виде железного или деревянного бруса, прочно прикрепленного к фундаменту или к стенам по одну и другую сторону диска за его пределами. К этому подручнику сперва прикладываем карандаш и прочерчиваем на лицевой поверхности вращающегося диска  $A$  несколько концентрических окружностей с диаметрами, близкими к  $\varnothing_1 = 150$  мм; одной из этих окружностей, наиболее близкой к заданному размеру, мы воспользуемся в дальнейшем как отметкой.

Вооружаемся затем алмазным резцом, резцом из сверхтвердых сплавов или, наконец, хорошо закаленным напильником с заточенным концом; смазкой при проточке может служить скипидар, керосин или мыльная вода.

Пользуясь подручником, начинаем протачивать резцом на поверхности стекла капавку с диаметром около 150 мм. Глубина капавки желательна не менее 0,5 мм, а ее ширина должна несколько превосходить толщину стенок той трубки, которой мы будем в дальнейшем сверлить стекло.

Если подручник укреплен жестко и если резец в руке не вибрировал, то канавка окажется концентричной с ободом зеркала.

Можно усложнить конструкцию станка и вместо временного подручника предусмотреть возможность укрепления любого резца на специальный суппорт, аналогичный устройству на рис. 49 или являющийся дополнительным развитием этого устройства.

Сверление, как известно, производится трубкой. У этой трубки внешний диаметр может быть равен заданному диаметру дыры или на несколько десятых миллиметра меньше этого диаметра; толщина же стенок в нашем случае будет близка к 1 мм. Торец трубки можно «набить» алмазной крошкой, но можно, за счет снижения производительности, обойтись и без алмазного порошка, подмазывая абразивную кашицу (карборундовую) между торцом трубки и стеклом.

Для нашего случая возьмем латунную трубу с внешним диаметром 150 мм и с внутренним диаметром 148 мм; так как толщина стеклянного диска ~108 мм, то длина трубы в 200 мм окажется вполне достаточной для наших целей.

На рис. 51 изображены: *A* — стеклянный диск с проточенной розцом канавкой *k—k'*; трубка *T* в верхней части скреплена с деревянной ручкой *P*; абразивная кашица время от времени подмазывается кисточкой под нижний торец трубки *T* или в канавку *k—k'*; можно также предусмотреть отверстие *O* в рукоятке *P* и использовать его для питания абразивной кашицей, стекающей вниз по вертикальной ступе трубки *T*.

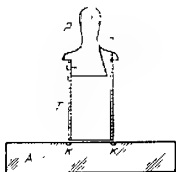


Рис. 51.

Сверление производится крупными размерами карборунда. Во время сверления диск *A* сравнительно быстро вращается на описанном выше столе; трубка *T* крепко удерживается в руках, получает правильное направление благодаря канавке *k—k'*, и время от времени приподнимается, чтобы дать доступ свежим порциям абразивной кашицы в кольцевую канавку.

Через несколько часов работы трубка проинфильтрует стекло на всю толщину, а в трубке окажется застрявшей стеклянная пробка с диаметром около 148 мм и высотой 108 мм.

Следует заметить, что в последний момент отделения стеклянной пробки от остальной массы стекла появляются значительные заколы на нижней поверхности зеркала. В дальнейшем они будут ликвидированы широкой фаской у нижнего основания дыры; но чтобы эта фаска не оказалась чрезмерно большой, полезно перед наложением диска на стол (рис. 49) подключить снизу диска стеклянную пластинку толщиной в 2—4 мм и с диаметром, несколько превышающим диаметр дыры; под этим местом можно не располагать смоляных шариков.



Сверление закончено, по стенки дыры требуют дальнейшей обработки. Прежде всего стенки имеют грубо-матовую поверхность; кроме того, вследствие постепенного износа и неизбежных покачиваний трубки  $T$  дыра получила не цилиндрическую, а слегка коническую форму с раструбом вверх. Для окончательной отделки дыры воспользуемся второй трубкой такого же или чуть большего наружного диаметра и расшлифуем ею аналогичным образом уже готовую дыру более мелкими шаждаками.

Если первоначальная направляющая канавка была хорошо проточена резцом, то и засверленная дыра оказывается соосной с ободом зеркала.

5. Обработка сферического углубления на лицевой поверхности. Возвращаемся к схеме рис. 49, не отклеивая диска от стола; только в этом случае заменяем планшайбу  $E$  (рис. 47) выпуклым шлифовальником («грибом») с радиусом кривизны около 5000 мм.

Полезно иметь два таких шлифовальника: один (для нашего случая) с диаметром около 300 мм и с радиусом кривизны, несколько меньшим 5000 мм, и другой с диаметром около 700 мм и с радиусом кривизны, по возможности близким к 5000 мм.

Первым шлифовальником мы работаем при относительно малом усилии, но зато и мало производительно, и стремимся получить углубление в центральной области диска, которое желательно распространить на диаметр 500—600 мм при радиусе кривизны, достаточно близком к 5000 мм. В начале работы этот шлифовальник сильно «притушится» в своей центральной части, а вышлифованное им углубление на первых порах будет иметь кривизну значительно меньшую, чем это нам необходимо, — вот почему первому шлифовальнику полезно сразу же придать преувеличенную кривизну.

Но постепенно кривизна сошлифованной лунки будет возрастать, а ее поперечник увеличиваться, и через некоторое время

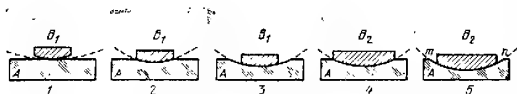


Рис. 52.

мы таким образом подготовим поверхность зеркала для ее обработки вторым более крупным и более точным по форме шлифовальником без опасения, что поверхность этого шлифовальника чрезмерно искажится при его неравномерном износе.

Последовательность такой обработки схематически показана на рис. 52, на котором:  $A$  — заготовка зеркала,  $B_1$  — малый шлифовальник,  $B_2$  — большой шлифовальник; прерывистой линией показана кривизна образовавшейся на стекле лунки.

Понятно, что если при начале работы (1) у шлифовальника  $B_1$  сильно притупилась вершина, а кривизна дуги значительно меньше желательной, то в середине работы (2) тем же шлифовальником он уже начинает работать значительной частью своей поверхности, постепенно приобретая сферическую поверхность с кривизной, средней между кривизмами притупленной вершины и нетронутого края; дуга же на стекле увеличивается в поперечнике и приобретает все большую и большую кривизну. В конце работы (3) диаметр дуги заметно больше диаметра шлифовальника  $B_1$ , а потому, как мы помним, кривизна шлифовальника и дуги будет возрастать, и нужно во-время остановиться, чтобы радиус кривизны дуги не оказался существенно короче заданного радиуса 5000 мм.

Таким образом, мы подготовили для большого шлифовальника условия, при которых он начнет свою работу (4) без заметного местного износа.

Мы также помним, как следует изменять длину штриха и вынос шлифовальника  $B_2$ , чтобы по возможности удерживать необходимую нам кривизну поверхности без подрезки шлифовальника, а потому у нас есть возможность перейти к конечной стадии обработки (5), выполнив у изделия заданную кривизну с достаточной точностью.

О том, как измеряется кривизна поверхности на различных стадиях обработки, будет сказано дальше.

Приближаясь к конечной стадии обработки (5), необходимо все более и более тщательно измерять ширину плоской кромки  $m-n$ . Если ширина кромки не однообразна вдоль окружности, то сферическая поверхность децентрирована относительно обода зеркала: вершина сферического сегмента смещена относительно оси обода зеркала в сторону наиболее узкого места кромки  $m-n$ .

Понятно, что для устранения такой ошибки следует производить шлифовку при остановленном шпинделе станка и ориентировать вынос шлифовальника в направлении наиболее широкого места кромки. Но работа при остановленном шпинделе, особенно с применением шлифовальников уменьшенного диаметра, приводит к искажению сферической формы поверхности изделия, а потому такую «местную» шлифовку следует чередовать с обычной, т. е. при вращающемся шпинделе и изделии, и тем самым сглаживать случайные ошибки и искажения сферической поверхности.

Работа закончена, когда радиус кривизны поверхности зеркала равен 5000 мм с отклонениями в пределах допусков грубой обработки, когда ширина кромки  $m-n$  по всей окружности одинакова в пределах конструктивных допусков и когда ширина этой кромки превышает заданные 15 мм на величину припуска для последующей тонкой шлифовки.

Если при окончательном изготовлении зеркала мы не предполагаем переходить на шлифовальники «полного размера»

( $D = 1000$  мм) и тонкую шлифовку будем заканчивать на шлифовальнике  $B_2$  ( $D \sim 700$  мм), то есть смысл продолжить шлифовку сферической поверхности более мелкими наждаками, однако, не самыми мелкими, работа на которых требует и другого помещения, и другой шлифовальной машины, и другого разгрузочного приспособления.

**6. Обработка фасок.** Фаски должны ликвидировать случайные мелкие, а иногда и более крупные заколы на острых ребрах стекла, возникшие при его шлифовке.

Но, кроме такого чисто эстетического значения, фаски служат для защиты острых ребер стекла от возможных сколов и повреждений в будущем при укладке оптического изделия в оправу и, особенно, при извлечении его из оправы; эти фаски можно назвать защитными.

Наконец, в некоторых случаях, и притом не всегда оптически грамотно, фаски используются в качестве опорных поверхностей, определяющих положение оптической детали относительно оправы или другой оптической детали; такие фаски можно назвать опорными.

Защитные фаски рационально делать под прямым углом к биссектрисе угла между двумя гранями стекла. Поэтому в нашем случае защитные фаски должны быть наклонены к оси зеркала под углом около  $45^\circ$ . Фаскам можно придать коническую форму поверхности, но можно выполнить фаски и со сферической формой поверхности\*). Так как ширина фасок обычно мала, то по внешнему виду первые практически неотличимы от вторых; различие же в особенностях их изготовления и в их точности (в случае опорных фасок) очень большое.

Конические фаски можно шлифовать либо шлифовальником в виде обратного конуса, подобному тому, как конический край притирается к коническому гнезду, либо с помощью плоской пластины (для фасок внешнего обода). В обоих случаях,

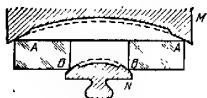


Рис. 53.

а во втором в особенности, производительность работы и точность поверхности фаски будут невысокими.

Сферические фаски шлифуются с помощью сферических шлифовальников: вогнутых ( $M$ ) — для внешних фасок ( $A-A$ ) и выпуклых ( $N$ ) для фасок внутренних ( $B-B$ ), это показано на рис. 53.

Если  $\varnothing$  — диаметр обода, на котором мы хотим нанести фаску под углом  $45^\circ$  к оси изделия, то радиус кривизны  $r$  соответственной чашки или гриба должен быть близок к

$$r = \varnothing \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,7\varnothing. \quad (85)$$

\*) Специфические опорные фаски использовал Л. А. Сухарев в самоцентрирующихся оправках астрономических объективов — см. список к с. 80. (Прим. ред.)

Так как шлифовальный диск для нанесения сферических фасок работает только своей внешней зоной, то остальная часть его поверхности может быть сточена на более низкий уровень или вообще отсутствовать, после чего шлифовальный диск обращается в толстостенную трубку с сферическим торцом. Естественно, что возможность присоединить в этом случае к вращательному движению изделия возвратно-поступательное качание шлифовального диска, повышает производительность обработки, а применяемый метод взаимной притирки двух сферических поверхностей позволяет автоматически получить поверхности фасок с оптической точностью.

Пусть эта точность совершенно не важна для рассматриваемого нами случая, а сферические фаски интересны лишь в смысле большей скорости их изготовления; но упомяну здесь, что много лет назад я предложил и применил метод сферических фасок к изготовлению колец сферометра\*) и на нескольких комплектах колец сферометров (Цейса и Бамберга) достиг простыми средствами более высоких точностей, чем это было возможно для лучших фирм, изготавливавших кольца с традиционной конической фаской.

Итак, для выполнения внутренних фасок у дыры с диаметром  $\varnothing_1 = 150$  мм делаем выпуклый шлифовальный диск с диаметрами рабочей поверхности (внешним и внутренним) около 165 мм и 135 мм (соответственно); радиус же кривизны рабочей поверхности выполняем близким к 106 мм, согласно (85).

Не снимая диска *A* с высверленной в нем дырой со стола *B* (рис. 49), выполняем небольшую (1—2 мм) внутреннюю защитную фаску на лицевой поверхности зеркала возле дыры.

Такую же или несколько более широкую внешнюю фаску следует нанести на внешней кромке обода; но для диаметра  $\varnothing = 1030$  мм мы, конечно, не собираемся готовить согнутый шлифовальный диск или трубу такого и даже несколько большего диаметра при радиусе кривизны  $\sim 730$  мм. Вместо этого мы приготовим небольшую чашу с диаметром 100—200 мм и с радиусом кривизны  $\sim 730$  мм и, притупив слегка острое зазубренное ребро диска медной пластинкой с наждачной кашицей, начнем шлифовать фаску вогнутой чашей, наклонив ее ось на  $\sim 45^\circ$  к горизонту и покачивая и медленно поворачивая чашу вокруг оси, как при притирке одной сферической поверхности к другой. Так, обработку по отдельным линиям мы заменим обработкой по участкам поверхности, а потому, быстро и просто работая на мелких наждаках, получим сферическую фаску надлежащего наклона к оси зеркала и желательной и однообразной ширины.

Выполнив фаски на лицевой поверхности зеркала, отклеиваем его от стола, перепорачиваем тыльной стороной вверх, про-

\*) См. *Максудов Д. Д.* Авт. св. № 34190 кл. 42h35, 7.12.1932; авт. св. № 55017 кл. 42h35<sub>03</sub>, 11.3.1937. (*Прим. ред.*)

ложив между лицевой поверхностью зеркала и опорными пятками стола три предохранительных войлочных или резиновых кружка и, не приклеивая зеркала к столу и не заботясь о его тщательной центровке, произведем снятие двух более широких фасок на тыльной стороне зеркала теми же инфокальниками. После этого заготовка зеркала принимает вид, изображенный на рис. 46.

Отклейку зеркала от стола проще всего произвести следующим образом: постепенно выщипывать один из стержней *a* (рис. 49) до отрыва смоляных шариков *c* от поверхности зеркала вблизи данного стержня, а затем перейти к такому же выщипыванию двух других стержней, пока смоляные шарики не окажутся оторванными на всех поверхности зеркала; зеркало же окажется лежащим на трех опорных пятках *b* и легко может быть снято и перевернуто для дальнейшей обработки и промывки керосином прилипшей смолы.

Отклейку можно произвести и иначе: путем вколачивания деревянных клиньев между зеркалом и столом до полного отрыва зеркала от смоляных шариков.

В обоих случаях для успеха дела желательно, чтобы смола была достаточно хрупкой и мало текучей, а потому при высокой температуре рабочего помещения полезно охладить смоляные шарики *c* (рис. 49) обильной струей холодной воды. Происходящее при этом охлаждение и сжатие стола является попутным благоприятным фактором, вызывающим в местах склейки скалывающие напряжения.

## СТАНКИ И МАШИНЫ ДЛЯ ТОНКОЙ ПЛИФОВКИ И ПОЛИРОВКИ

Заключив с приданием геометрической формы заготовке зеркала, мы переносим заготовку из сравнительно грязного помещения, где происходили все описанные выше работы, в чистое и специально оборудованное помещение. Здесь будущее зеркало будет только отшлифовано и отполировано и здесь же оно приобретет точную расчетную форму поверхности с погрешностями, не превышающими  $\frac{1}{20}$ — $\frac{1}{40}$  мкм, и будет не один десяток раз подвергнуто тщательному оптическому исследованию и контролю.

Поэтому к помещению предъявляются строгие требования: 1) чистоты, 2) постоянства температуры, 3) простора для осуществления необходимых схем оптического исследования.

Для такой производственной лаборатории лучше всего выбрать большое полуподвальное помещение с толстыми стенами и сводчатым потолком, либо построить специальное помещение в первом этаже, окруженное со всех сторон отапливаемыми комнатами и коридором. Лучше, если в такой лаборатории будет только одна входная дверь и ни одного окна.

Искусственная вентиляция должна обеспечить здоровые условия для работы мастеров. Вентиляция, печное, электрическое или паровое отопление должны быть устроены так, чтобы принудительные и конвекционные потоки воздуха проходили по возможности в стороне от шлифовальной машины.

Стены и потолки необходимо выкрасить белой масляной краской; панель можно выполнить из белых кафельных плит. Хорошим полом является пол цементный с наклеенным на него гладким линолеумом. Пол следует промывать почти ежедневно, а стены и потолок — несколько раз в год. Электропроводка, распределительные щиты, шкафы, печи или радиаторы, водопровод и т. д. должны быть устроены так, чтобы они не являлись собирателями и источниками пыли; в еще большей степени это следует отнести к самой шлифовально-полировальной машине и ее вспомогательным устройствам и приводам.

Основным оборудованием, так сказать «гвоздем», оптической лаборатории является шлифовально-полировальная машина, одна или несколько, в зависимости от задач лаборатории и условий экономии площади. К описанию таких машин я сейчас и приступим.

Простейший современный оптический шлифовальный станок построен на следующем кинематическом принципе (рис. 54).

Главный шпиндель станка с осью вращения  $M$  песет на себе шлифуемое изделие  $A$  (или, в других случаях, шлифовальныйник), тогда как шлифовальныйник  $B$  (или, в других случаях, изделие) прижимается к  $A$  центральным поводком  $N$ , совершающим возвратно-поступательные движения по дуге радиуса  $CN$ . Коромысло  $CD$ , с которым связан поводок  $N$ , имеет ось вращения в точке  $C$  и шарнирное сочленение в точке  $D$  с шатуном  $DE$ ; второй шарнир  $E$  шатуна сочленен с кривошипом, вращающимся вокруг оси  $F$  от общего или от независимого привода.

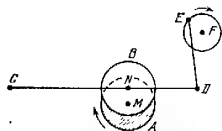


Рис. 54.

При таком устройстве штрих оказывается не прямолинейным, а дугообразным, но так как радиус дуги ( $CN$ ) значительно больше длины дуги (длины штриха  $l$ ), то штрих по дуге мало отличается от прямолинейного и практически обладает свойствами прямолинейного штриха.

Длина штриха  $l$  приблизительно равна:

$$l \approx 2EF \frac{CN}{CD}. \quad (86)$$

Но так как имеется конструктивная возможность изменять по желанию расстояние точки  $E$  до оси  $F$ , уменьшая величину  $EF$  от некоторой предельной для станка до нуля, то и длину штриха можно изменять от некоторой предельной до нуля.

Вынос шлифовального  $B$  за край изделия  $A$  осуществляется путем соответственного раздвижения или сближения точек  $D$  и  $E$ , предусмотренного в конструкции шатуна.

Наконец, смещение штриха в сторону от оси вращения  $M$  возможно благодаря тому, что поводок  $N$  можно передвигать в некоторых пределах вдоль коромысла  $CD$ .

Так как поводок  $N$  упирается своим шаровым окончанием в коническое гнездо в центре шлифовального  $B$ , то поводок сообщает шлифовальному только возвратно-поступательные движения штрихов и не препятствует шлифовальному вовлекаться изделием  $A$  во вращательное движение с угловой скоростью, тем больше приближающейся к угловой скорости вращения изделия  $A$ , чем короче штрих и меньше вынос шлифовального  $B$ .

Описанный станок можно характеризовать как станок с одним эксцентриком, с квази-прямолинейным регулируемым штрихом и с свободным вращением верхнего звена  $B$ , увлекаемого нижним звеном  $A$ .

Рассмотрим возможные усложнения описанной выше кинематики.

Кажется, Грёбб впервые предложил станок с двумя кривошипами. Схема станка с двумя кривошипами (рис. 55), имеющими соответственно оси вращения  $F_1$  и  $F_2$  и сочленения с движущимися шатунами в  $E_1$  и  $E_2$ , позволяет привести шарнирно-

члененный поводок  $N$  в самые разнообразные по форме движения. В зависимости от того, вращаются ли эксцентрики в одну или в разные стороны, с одинаковой или различной угловой скоростью, равны или не равны друг другу плечи  $E_1F_1$  и  $E_2F_2$ , точка  $N$  будет описывать окружности, овалы, прямые линии, «восьмерки» и самые причудливые петли и сложные фигуры.

Два эксцентрика позволяют воспроизвести штрих почти любой задуманной нами формы, а насколько это важно или неважно для практических целей, мы скажем дальше.

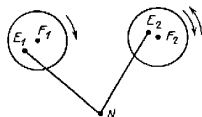


Рис. 55.

Двухкривошипный стапок, преследующий специальною целью периодического смещения штриха в сторону от центра звена  $A$ , осуществлен, по-видимому, впервые, Ричи и представляет собой сочетание схем рис. 54 и 55. Кинематическая схема такого или аналогичного по замыслу стапка представлена на рис. 56. Здесь  $F$  — главный кривошипный вал, приводимый в сравнительно быстрое вращение и осуществляющий штрих, т. е.

перемещение поводкового устройства  $N$  по дуге радиуса  $CN$ . Для разгрузки и уменьшения прогибов стержней стержень  $EK$  проходит через цилиндрическую направляющую  $J$ , имеющую вращение только вокруг вертикальной оси. Стержень  $CD$  проходит через аналогичную направляющую  $G$ , связанную со стержнем  $EK$  и имеющую регулировочное приспособление для его небольших перемещений вдоль стержня  $EK$ .

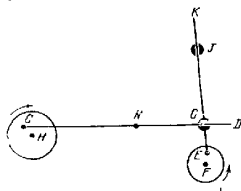


Рис. 56.

Описываемая схема принципиально ничем не отличается от схемы рис. 54 до тех пор, пока мы не свяжем точку  $C$  со вторым кривошипом, медленно вращающимся вокруг оси  $H$  и выполняющим медленное смещение штриха в сторону от центра нижнего звена  $A$ , на рисунке не показанного.

Такая «машинка Ричи» воспроизводит квази-прямолинейный регулируемый штрих, периодически смещаемый в сторону от центра нижнего звена  $A$ . Она преследует цель сглаживания зональных ошибок, если таковые по какой-то причине получаются на поверхности зеркала, и довольно усложнено с этой задачей справляется ценой значительного усложнения конструкции, большого числа вибрирующих и изнашивающихся сочленений и некоторой сложности управления такой машиной.

Если не приводить второй кривошип во вращение, или если при вращающемся кривошипе совместить точку  $C$  с осью вращения  $H$ , то машина будет работать по схеме рис. 54.



Заметим, что наша 1-метровая шлифовально-полировальная машина построена (около 1936 г.) по схеме рис. 56, и еще заметим, забегая несколько вперед, что обычно мы работали только на одном кривошипе, выключая второй, отказываясь от преимуществ машины Ричи и используя свойства простейшей схемы рис. 54.

Кроме изменений траекторий штриха, можно ввести еще и изменение скорости вращения верхнего звена  $B$  относительно нижнего звена  $A$ , т. е. вместо свободно-увлекаемого вращения звена  $B$  дать ему принудительное вращение от специального механизма. В этом случае можно дойти до почти полного торможения звена  $B$ , и тем самым как бы приблизиться к условиям ручной шлифовки и полировки, описанной нами в предыдущей главе.

Если бы условия ручной шлифовки и полировки являлись идеальными и единственными, приводящими к точной форме обрабатываемого изделия, то в таком случае мы были бы должны пойти на значительное усложнение конструкции машины и выполнить принудительное вращение шлифовальника  $B$ . Но если и при свободном вращении шлифовальника удастся получить точные поверхности с таким же успехом, то стоит ли в машине снело копировать кинематику ручной обработки и вводить лишние усложнения и осложнения?

При вынужденном вращении шлифовальника достигается, правда, большая производительность обработки, так как при одинаковой скорости вращения главного шпинделя относительные скорости изделия и шлифовальника возрастают.

Но такое повышение производительности достигается, конечно, за счет затраты больших мощностей, за счет большого износа машины, работающей теперь рывками, за счет больших ее вибраций. Поэтому не проще ли при заданной мощности моторов повысить скорости вращения частей машины со свободно вращающимся шлифовальником и тем самым достичь должной производительности обработки? Если бы конструкция машины не позволила повышения числа оборотов против некоторого оптимума, то при вынужденном вращении шлифовальника та же машина потребовала бы значительного снижения скоростей относительно этого оптимума, и производительность обработки соответственно снизилась бы.

Наконец, при свободном вращении шлифовальника мы лучше всего приближаемся к равенству относительных скоростей на различных зонах изделия и шлифовальника, а это не только благоприятствует равномерности сошлифовки, но и делает работу более спокойной и свободной от чрезмерных местных трений и присасываний между обрабатываемой и обрабатывающей поверхностями.

Заметим, что первоначально большая машина ГОИ была спроектирована и построена (около 1934 г.) с вынужденным вращением шлифовальника, но практическая работа вскрыла

беспольность и даже вредность многих теоретически полезных устройств; мы сами отказались от вынужденного вращения шлифовальника и коренным образом переконструировали вообще машину, т. е. фактически построили новую, в которой сохранились от прежней машины лишь некоторые громоздко детали ее основания, оставленные нами в прежнем виде ради некоторой экономии времени, материалов и средств.

Рассмотрим, каким требованиям должна удовлетворять хорошая шлифовально-полировальная машина.

Было время, когда сам я думал, что большое разнообразие формы штрихов позволит установить рецепты на все случаи жизни и выбирать для каждой формы поверхности изделия некоторую наилучшую форму штриха. Было время, когда я имел длительный опыт ручной шлифовки и почти никакого опыта шлифовки машиной, а поэтому думал, что вынужденное вращение шлифовальника (его торможение) позволит получить лучшие результаты только потому, что машина станет лучше имитировать ручную работу опытного кустари.

Теперь, на склоне моей оптической деятельности, все это можно назвать увлечениями молодости.

Длительный опыт показал, что наилучшим штрихом для получения плавной поверхности без завала на внешней зоне является штрих прямой или кривой или кривой-прямой, т. е. по дуге достаточно большого радиуса.

Диаметр шлифовальника (а полировальника во всяком случае) следует брать равным диаметру изделия. Штрих следует вести от центра в одну сторону, т. е. при равных диаметрах изделия и инструмента, смещать инструмент с изделия в одну сторону, а затем возвращать его в соосное с изделием положение.

Длина штриха, близкая к  $\frac{1}{2}$  диаметра изделия, по-видимому, является наиболее благоприятной для получения поверхности и без завала и без мелких зон. Штрих более длинный может вызвать завал на внешней зоне. Штрих более короткий благоприятствует появлению мелких зональных ошибок, так как при крупных полировальниках трудно ожидать абсолютной однородности смолы и геометрической правильности ее подрезки.

Штрих в виде овалов, восьмерок и петель почти всегда способствует появлению завала на внешней зоне. Вынужденное вращение полировальника почти всегда ведет к срыву внешней зоны, т. е. к появлению завала.

Автоматическая «растушровка» штриха (см. рис. 56) не обязательна и может быть заменена, в случае действительного появления мелких зональных ошибок, смещением поводка  $N$  в новое положение, эксцентричное по отношению к полируемому зеркалу; следует не злоупотреблять долго применением эксцентричного поводка и снова возвратиться к нормальному режиму полировки. Значительно важнее добиться однородности полировочной смолы и правильной ее подрезки.

На изменение формы поверхности изделия в большинстве случаев можно воздействовать изменением длины штриха и смещением его относительно центра зеркала. Простейший же способ воздействия на форму и на кривизну поверхности зеркала — это соответственная подрезка полировальника.

Существенное значение имеет соотношение числа штрихов полировальника и числа оборотов изделия. На рис. 57 схематически представлены два крайних случая: 1) когда это соотношение выражается большим числом и 2) когда оно выражено

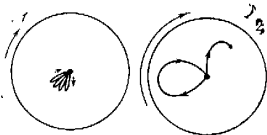


Рис. 57.

малым числом. В первом случае обработка изделия в основном выполняется за счет штриха, но не за счет разности угловых скоростей изделия и шлифовальника. Во втором случае, при относительно медленном штрихе, но быстром вращении стола с изделием, обработка идет в основном за

счет разности угловых скоростей изделия и шлифовальника; эта разность, а вместе с ней и разность линейных скоростей, обуславливающая обработку, возрастает по мере увеличения выноса: от нуля, когда вынос равен нулю, до максимального значения при максимальном выносе. Но так как шлифовальник представляет собой значительную инерционную массу, приводимую во вращение с переменной скоростью, то в действительности скорость вращения шлифовальника будет изменяться в значительно меньших пределах: шлифовальник (или полировальник) является своего рода маховиком, стремящимся поддерживать постоянство скорости своего вращения.

Какой из описанных выше двух режимов выгоднее? Кажалось бы первый, так как при нем не только штрих, но и его след на зеркале практически прямолнейны, а потому мы в значительной мере гарантированы от завала края.

Но такой режим имеет свои явные недостатки: во-первых, для совершения достаточной полезной работы приходится придавать поводку и шлифовальнику сравнительно быстрые возвратно-поступательные движения, а такие движения менее выгодны, чем движения вращательные, и приводят к значительно более быстрому износу машины; во-вторых, при кружной оптике вращение стола вместе с зеркалом окажется настолько медленным, что при измельчающемся и подсыхающем абразиве (пашадк, крокус) отдельные азимуты зеркала будут находиться в существенно различных условиях обработки за время цикла одной подмазки абразивной кашицы; в результате поверхность зеркала может приобрести заметные азимутальные ошибки, и в частности — астигматизм.

Поэтому мы предпочитаем приближаться ко второму режиму, не доводя его, конечно, до крайности. Соотношение между чис-

лом качаний поводка и числом оборотов главного шпинделя можно брать близким к 2—3. Но необходимо помнить, что это соотношение не должно быть выражено простым числом или близким к нему кратным; так, если бы, например, мы приняли соотношение равным 3, то за время каждого оборота зеркала центр шлифовальника описывал бы по одним и тем же точкам поверхности зеркала фигуру в виде трилистника, а зеркало могло бы приобрести азимутальные ошибки с трехосной симметрией.

Абсолютные значения скоростей вращения главного шпинделя и возвратно-поступательных движений поводка не могут быть точно фиксированы, отчасти потому, что сами они могут находиться в различных соотношениях, а отчасти и потому, что на различных стадиях обработки желательны различные скорости. Если принять конструкцию, при которой число возвратно-поступательных движений поводка в 2—3 раза больше числа оборотов главного шпинделя и если скорость вращения главного шпинделя равна  $N$  об./мин., а диаметр обрабатываемого изделия равен  $D$  мм, то не следует, чтобы  $N_{\max}$  заметно превышало следующую эмпирическую величину:

$$N_{\max} \approx \frac{6000}{D}. \quad (87)$$

Так, для обработки зеркала с диаметром 1 м ( $D = 1000$ ) можно рекомендовать в качестве максимальной скорости вращения главного шпинделя  $N_{\max} = 6$  об./мин., соответственно поводок будет совершать не более 12—18 возвратно-поступательных движений в минуту и, значит, столько же оборотов в минуту будет совершать и приводящий его в движение кривошипный вал.

При тонкой шлифовке последним номером тонкого наждака обычно работают на скоростях, приблизительно вдвое меньших.

После всех приведенных выше соображений станет понятным принцип конструкции шлифовально-полировальных машин, рекомендованный мной на основании многолетнего опыта. Этот принцип в общих чертах изображен на рис. 58.

В верхней части рисунка схематически изображен план машины; в нижней части рисунка представлены более подробно конструкция машины для вида спереди; кривошипный вал  $F$  на втором рисунке не представлен ради сохранения наглядности чертежа; шарнирные сочленения показаны схематически без пояснения их конструкции; относительные размеры на чертеже не выдержаны.

Зеркало  $A$  покоится на разгрузочном приспособлении стола  $Q$ ; разгрузочные приспособления, нижние и боковые, нами частично уже описаны. Стол вместе с зеркалом  $A$  вращается вокруг вертикальной оси  $M$ , приводимой с помощью червячного колеса (9) и не показанного на рисунке червяка в соответствующее медленное вращение. Шлифовальник или полировальник  $B$  связан с поводком  $N$  (подвешен к нему). На рисунке поводок  $N$

заканчивается шаром, закатываемым в гнездо шлифовальника; но такая подвеска шлифовальника неудовлетворительна при его больших размерах: шлифовальник заметно деформируется и «провисает» от собственного веса. Поэтому, в действительности, шлифовальник приходится подвешивать, например, в шести точках

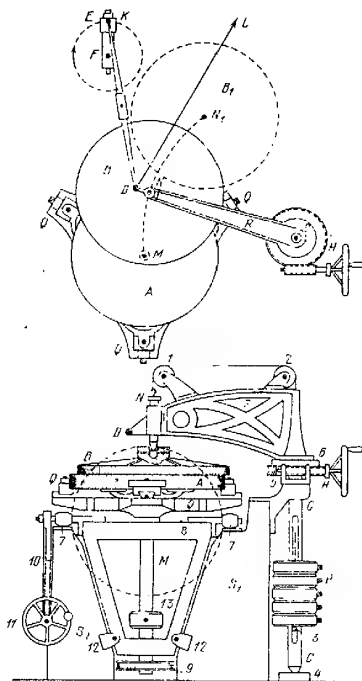


Рис. 58.

к трем коромыслам, а эти последние устанавливать на осях в вершинах треугольника, в свою очередь подвешенного к шару поводка N. Таким образом не только для обрабатываемого из-

дения, но и для шлифовальника нужна достаточно хорошая разгрузка.

Поводок  $N$  находится на конце поворотного хобота  $R$  и может перемещаться в своем подшипнике вверх — вниз, тогда как от проворачивания его удерживает шпонка. Хобот  $R$  вращается вокруг вертикальной оси  $C$ , имея на другом конце шарнирное сочленение  $D$  с шатуном  $DE$ . Шатун  $DE$  раздвижной, что позволяет регулировать смещение оси  $N$  относительно оси  $M$ . Этот шатун шарнирно сочленяется в точке  $E$  с кривошипом  $K$ , установленным на суппорте кривошипного вала  $F$ ; длина нитриха регулируется изменением радиуса кривошипа  $EF$ .

В процессе подправки и, особенно, в процессе тонкой шлифовки приходится уменьшать давление инструмента  $B$  на зеркало  $A$ , для чего от поводка  $N$  пропущен трос через блоки  $1$  и  $2$ , уходящий затем внутрь полого вала  $C$  и заканчивающийся стержнем  $3$ , пропущенным через пилы в валу  $C$ ; на этот стержень опираются грузы  $P$ , разгружающие вес инструмента  $B$ . Число действующих грузов может изменяться: для этого достаточно ненужные нам грузы приподнять несколько вверх и зафиксировать их боковыми створными винтами на валу  $C$ . Вал  $C$  укреплен между подшипником  $4$  и подшипником  $5$ ; последний укреплен на железобетонном столбе  $S_1$ .

Для подрезки шлифовальника, для промывки зеркала, а также для его оптического исследования необходимо сдвигать инструмент  $B$  с разделки  $A$ , приводя  $B$  и поводок  $N$  в положение  $B_1$  и  $N_1$  (верхняя часть рисунка). Для этого приходится расчлнить тягу  $ED$  с хоботом  $R$  в точке  $D$ , а затем либо оттягивать хобот с помощью троса и лебедки  $L$  в направлении  $DL$ , либо вращать хобот  $R$  вокруг оси  $C$  с помощью червячной пары  $H$ , причем червячное колесо (или сектор) в этом случае следует скреплять с диском  $6$  хобота  $R$  или соединять затяжным хомутом с валом  $C$ .

На бетонных столбах  $S_1$  и  $S_2$  укреплены подшипники  $7$ , в которых качается рама  $8$ , несущая на себе главный вал (шпиндель)  $M$  в соответствующих подшипниках. Этот вал заканчивается внизу червячным колесом  $9$  и приводится во вращение от червяка и привода, не показанных на рисунке.

Для оптического исследования поверхности зеркала последнее необходимо привести в вертикальное положение, показанное на нижней части рисунка прерывистой окружностью. Наклон зеркала производится вместе со столом  $Q$ , рамой  $8$ , валом  $M$  и червячным колесом  $9$ . Для этого к левой цапфе рамы  $8$  прикреплен червячный сектор  $10$ , а на столбе  $S_2$  укреплен червяк с маховичком  $11$ ; вращая червяк, мы постепенно наклоняем раму  $8$  со столом и зеркалом в нужное для оптического исследования положение. В рабочем положении рама  $8$  упирается в ограничитель  $12$  и фиксируется в этом положении особым устройством с другой стороны от столбов  $S_1$  и  $S_2$ ; при этом червячное колесо  $9$  оказывается надлежащим образом сочлененным

со своим приводным червяком. Для балансировки паляиниющих-ся частей машины служат подвижные вдоль оси  $M$  противо-вес 13.

Такая машина занимает сравнительно немного места и, если  $\varnothing$  есть максимальный диаметр изделия, обрабатываемого на данной машине, то место, занятое под машину, имеет глубину около  $2,5\varnothing$ , а ширину менее  $2\varnothing$ . Так, например, машина для изготовления 3-метрового зеркала потребует участка помещения глубиной около 7 м при ширине менее 6 м.

Для возможности осуществления оптических исследований такого зеркала требуется, конечно, значительная дополнительная длина производственного помещения, связанная с величиной радиуса кривизны зеркала; но ширина этого помещения может быть не больше  $5\frac{1}{2}$  м.

Описанная выше машина может быть охарактеризована, как однокривоизгибая машина с квази-прямолинейным регулируемым штрихом, с свободным вращением шлифовальника, с разгрузочным приспособлением для изделия и шлифовальника и с наклоном стола и изделия для оптического исследования по-следнего.

На такой машине могут быть с успехом изготовлены круп-ные оптические плоскости, выпуклые и вогнутые сферические поверхности умеренной кривизны и поверхности умеренной асфе-ричности, вроде параболческих зеркал.

Для изготовления резко-выраженных асферических поверх-ностей, когда одной подрезки полировальника недостаточно и приходится деформировать поверхность малыми шлифовальни-ками, а затем полировальниками, можно поступить следующим образом: к поводку  $N$  укрепить малый шлифовальник или поли-ровальник особой формы в виде лунки, ограничить число степе-ней его свободы на одну степень и обрабатывать им изделие на лункой зоне при очень малом значении эксцентриситета  $EF$ , но при значительном расходе устройства, изменяющего длину тяги  $ED$ .

Для исправления астигматизма и других азимутальных оши-бок изделия  $A$  необходимо, как мы помним, работать при оста-новленном шпинделе  $M$ , и такая возможность также имеется у описанной нами машины.

Такой машиной, даже в случае очень крупных ее размеров, может управлять один человек, обращаясь к посторонней помо-щи лишь при укладке изделия  $A$  на стол  $Q$  и при подвеске шлифовальников и полировальников. Если же снабдить оптиче-скую лабораторию соответственным краповым хозяйством, то все операции, кроме начальной и конечной транспортировки тя-жестей, могут быть выполнены силами одного человека.

Итак, мы перенесли грубо обработанную заготовку зеркала в чистое специально оборудованное помещение и уложили зер-кало на стол шлифовальной машины, подвесив к ее поводку уже прошлифованный и подогнанный по кривизне шлифовальник.

Хорошо, если шлифовальный диск имеет тот же диаметр, что и зеркало (в нашем примере 1 м); но можно, хотя и несколько труднее, работать на шлифовальнике уменьшенного диаметра (в нашем примере не менее 70 см).

Работу начинаем на достаточно мелком 60-минутном шабдаке с тем, чтобы закончить ее шабдаком 240-минутным. Но если нет уверенности в высокой чистоте 240-минутного шабдака и если мы согласны на более длительную полировку при меньшем риске испортить изделие во время тонкой шлифовки, то можно начать ее 30-минутным шабдаком и закончить шабдаком 120-минутным.

Во время шлифовки полезно прокладывать между зеркалом и тарелками разгрузочного приспособления круглый лист из тонкой резины с диаметром, превышающим на несколько сантиметров диаметр зеркала. Хорошо приклеить резиновым клеем резиновый же обод к этому листу или, еще проще, подогнуть кверху его край с помощью пришитых к нему проволоочных колец и ребер жесткости с тем, чтобы абразивная кашка не затекала на разгрузочное приспособление, не разбрызгивалась на части машины и на пол и могла быть удаляема мокрой губкой по мере ее накопления на резиновой прокладке. Резиновую прокладку можно заменить брезентовым промасленным поддоном (в виде круглой сковороды с низким ободом).

При полировке можно пользоваться теми же, только тщательно промытыми, предохранительными прокладками; но можно полировать и без всяких прокладок, так как крокуса расходуется сравнительно мало, а загрязнение от него нежелательно лишь для машины и безвредно для изделия.

Замечу здесь, что начинающие мастера полагают, что полировка должна протекать быстрее и успешнее при большом избытке крокуса: они расходуют на малое зеркало больше крокуса, чем опытный мастер расходует на большое. В действительности крокус нужен для образования и освежения полирующего слоя; свободные же зерна крокуса в большом количестве скорее вредны, чем полезны.

При крупных размерах изделия и инструмента (шлифовальника, полировальника) и их медленном вращении абразивная кашка, подмазываемая на оголяющийся край изделия, медленно распространяется по обрабатываемой поверхности. В результате обработка поверхности идет неравномерно по азимутам и по зонам, а при полировке смолы, кроме того, приобретает существенно различную температуру в различных точках полировальника, что в свою очередь ведет к неравномерному сполировыванию поверхности изделия.

В случае обработки вогнутых поверхностей их вогнутая форма облегчает распределение абразива по поверхности, позволяя стекать абразивной кашке к центральным участкам изделия при подмазке на его внешней зоне; но при обработке выпуклых поверхностей их центральные участки получают абразивную



взвесь в явно недостаточных количествах: подмазываемый абразив выбрасывается за край изделия не только центробежной силой, но и уклоном выпуклой поверхности; к центральным же участкам изделия доходят скудные порции абразива, уже в значительной мере отработавшего на промежуточных зонах.

Вот почему полезно производить подмазку абразива не только со стороны внешней зоны изделия, но и вблизи его центра. С этой целью можно высверлить отверстие вблизи центра шлифовальника или полировальника (но не в самом центре) и через укрепленную в отверстии воронку подавать порции абразивной взвеси.

Отказаться совсем от подмазки на внешней зоне — это значит впасть в другую крайность, так как внешние зоны изделия и инструмента, оголяясь при каждом штрихе, соприкасаются с воздухом и подсыхают быстрее остальных зон, а потому смола на внешней зоне полировальника, особенно в случае вогнутой формы изделия, заметно перегревается и изделие приобретает зональную ошибку в виде «завала края».

Чем короче штрих, тем больше оснований для появления зональных ошибок у изделия. Поэтому не следует слишком бояться длинного штриха. Мы помним, что для устранения «завала края» или для получения «подвернутого» края хорош короткий прямолинейный штрих; сейчас уместно сказать, что это должен быть не просто короткий штрих, но штрих, сопровождаемый обязательным охлаждением (подмазкой) внешней зоны; кроме того, подвернув край таким штрихом с некоторым избытком, необходимо перейти на достаточно длинный штрих ( $\sim \frac{1}{3} D$ ) для получения плавной поверхности, т. е. для сглаживания зональных ошибок; наконец, полезно время от времени переходить на работу при укороченной тяге  $ED$  (рис. 58), т. е. несколько не доводить центр  $N$  полировальника до центра  $M$  изделия, а затем снова возвращаться к нормальному режиму, при котором  $N$  и  $M$  совпадают в мертвой точке штриха.

Заключив тонкую шлифовку и убедившись, что поверхность приобрела равномерный нежный мат и что отдельные точки и ячейки от предыдущего номера наждака исчезли на всей поверхности, мы приготавливаем полировальник для последней операции — полировки. Основой для полировальника служит либо выполнивший уже свою работу шлифовальник, либо отдельная металлическая отливка приблизительно такой же формы, но с поверхностью, грубо обработанной под заданную кривизну: при толщине смоляного слоя в 3—5 мм было бы излишней роскошью требовать высокой точности поверхности. Так как в процессе полировки не исключена возможность исцарапать поверхность изделия и возвратиться снова к тонкой шлифовке, то предпочтительно сохранить в неприкосновенности шлифовальник, а для полировальника использовать отдельную отливку.

Металлический корпус полировальника подогревается до температуры  $40-50^{\circ}\text{C}$  и устанавливается приблизительно горизонтально на табурете подходящей высоты, после чего мы выливаем на поверхность корпуса (в нашем случае выпуклую) расплавленную, хорошо размешанную и уже остывающую смолу в количестве, достаточном для образования слоя толщиной не менее 2 мм (лучше 4—5 мм). Распространив эту смолу с помощью куска мокрой ремешной кожи или влажной рукой более или менее равномерно по поверхности корпуса полировальника, выдавливаем мокрой деревянной линейкой первоначальную сетку взаимноперпендикулярных канавок (см. рис. 40), а затем при дальнейшей «формовке» полировальника повторяем многократно ту же операцию, пока не затвердела смола, преследуя цель получить возможно более правильные и резко ограниченные желобками ячейки на поверхности полировальника. Попытно, что при выдавливании желобков на плоском или выпуклом полировальнике можно пользоваться плоской линейкой, тогда как для полировальника вогнутого необходимо изготовить выпуклую линейку такой же или даже несколько большей кривизны.

Формовать полировальник по поверхности тонко отшлифованного изделия можно лишь в случае сравнительно небольших их размеров (диаметр до  $\sim 0,5$  м). Для формовки крупных полировальников мы используем обратную форму, т. е. вспомогательный шлифовальник, на котором шлифовывался рабочий шлифовальник: эта форма, являясь обратной для шлифовальника, повторяет собой форму изделия.

Полировка закончится не ранее чем исчезнут последние точки и следы от ячеек мата при наблюдении в сильную лупу и при ярком и благоприятно направленном освещении. Но мы помним, что полировку следует еще несколько продолжить, чтобы сгладить подслои микроскопических трещин.

Блестящая хорошо отполированная поверхность недостаточна для того, чтобы назвать поверхность оптической; для этого она, кроме того, должна иметь заданную геометрическую форму с необходимой для оптических целей точностью.

Понятие «геометрическая форма» складывается из двух более узких понятий: 1) кривизны поверхности или, точнее, радиуса кривизны  $R_0$  при вершине поверхности (для поверхностей вращения) и 2) собственно формы поверхности, т. е. ее уравнения независимо от значения  $R_0$ .

В большинстве практических случаев необходимо удовлетворить одновременно двум условиям: получить поверхность строго заданной кривизны при строго заданной форме; так, шлифуя и полируя линзу объектива, мы должны придать ее поверхности точную сферическую форму с достаточно строго выдержанным значением радиуса кривизны. В случае линз мы имеем еще третье ограничительное условие: изготовленная линза должна иметь строго заданную толщину. Неудивительно поэтому, что изготовление линз для объектива, а также и менисков для

менисковых систем, сопряжено с большими трудностями, и только сферическая форма их поверхностей значительно облегчает эту трудную задачу.

В некоторых же случаях, как например, в случае параболического зеркала для телескопа, мы обязаны строго удовлетворить только второе условие: придать поверхности зеркала параболическую форму. Но мы мало заботимся о соблюдении точного значения параметра (фокусного расстояния) параболического зеркала, так как будет ли телескоп на несколько сантиметров короче или длиннее своей первоначально запроектированной длины, ничего плохого от этого не произойдет и качество изображения не пострадает; конечно, сильно отклоняться от расчетного значения параметра и в этом случае нельзя, особенно, если труба телескопа уже сконструирована, а потому и в этом случае необходимо контролировать кривизну изготавливаемой поверхности, только контролировать ее можно с пониженной точностью.

Итак мы стоим перед задачей контроля кривизны поверхности и контроля ее формы. Но мы не сможем подробно и полно освоить эту задачу, пока не получим представления о замечательном контрольном оптическом методе, предложенном без малого сто лет тому назад знаменитым физиком и оптиком Фуко.

Описанию основ метода Фуко — так называемого *тенсового метода* — мы посвятим следующую главу и не раз еще встретимся с этим методом в дальнейших главах книги.

## ОСНОВЫ ТЕПЕВОГО МЕТОДА

В 1856 г. Леон Фуко предложил замечательный метод исследования оптических поверхностей и систем. Этот метод произвел полную революцию в области производства оптики астрономических инструментов.

Если прежде, до Фуко, осуществление удовлетворительного параболического зеркала требовало большой затраты труда и исключительного искусства, если прежде оно в значительной мере являлось результатом счастливой случайности, то метод Фуко принес с собою возможность наглядно просто и высокочувствительно контролировать форму полного фронта, а отсюда уверенно и шаг за шагом приближаться к требуемой форме полируемой поверхности изделия.

В случае вогнутых поверхностей метод Фуко заменил собой метод пробного стекла, неприменимый для поверхностей достаточно крупных. В случае объективов или иных сложных оптических систем метод Фуко оказался значительно выгоднее появившегося много позднее метода Гартмана и даже метода интерферометра \*).

Наконец, метод Фуко позволил дать сперва качественную, а затем и количественную оценку неоднородностей стекла.

От сомнительных по качеству телескопов В. Гершеля или лорда Росса техника, вооруженная методом Фуко, делает скачок вперед к новым современным высококачественным телескопам, удовлетворяющим требованию Рэлея ( $\frac{1}{4}\lambda$ ), т. е. способным при

\*) Выгода тепевого метода заключается в простоте, наглядности и оперативности; оптик, не прибегая к дополнительной обработке результатов наблюдений, непосредственно видит ошибки исследуемой поверхности, хотя количественные оценки здесь затруднены. Появление лазеров позволяло усовершенствовать интерференционные методы контроля. Разработаны неравноплечные интерферометры, позволяющие исследовать крупные зеркала с использованием в качестве эталонных малых высокоточных зеркал. Методы Гартмана и интерференционный требуют фотографической регистрации, проявления негатива, его измерения и математической обработки измерений. Однако современные средства позволяют значительно ускорить этот процесс и выдать непосредственно карту отступлений рельефа зеркала от заданной поверхности со строго количественными оценками. Ни один из известных в настоящее время методов не может рассматриваться как полностью исключающий другие. Поэтому при изготовлении крупной астрономической оптики используется ряд методов дополняющих друг друга. Тепевому методу здесь по-прежнему принадлежит почетное место. (Приж. ред.)

надлежащих атмосферных условиях дать безупречные изображения, практически неотличимые от изображений в идеальном оптическом приборе.

Пусть некоторые мастера не располагают достаточным искусством для изготовления первоклассной оптики, или пусть неудачная конструкция телескопа и плохие атмосферные и температурные условия не позволяют проинить телескопу всей своей мощи, наконец, пусть некоторые фирмы не обладают достаточной добросовестностью, выпуская не вполне доброкачественную оптику. Но теперь, в случае плохого качества инструмента, иногда можно найти виновника и нельзя сослаться на несовершенство методики контроля оптических систем.

Конечно, метод Фуко оказался применимым не для всех случаев исследования оптических поверхностей. Так, выпуклые поверхности не могут быть непосредственно исследованы методом Фуко. Но выпуклые поверхности входят, как элементы, в оптические системы, преобразующие падающую волну в новую волну, сходящуюся в фокусе системы; так как такую сходящуюся волну метод Фуко способен исследовать, то и ошибки выпуклых поверхностей могут быть обнаружены и учтены, если и не прямо, то косвенно. Наконец, мы можем придумать и осуществить

целый ряд таких оптических схем исследования, в которых исследуемая выпуклая или плоская поверхность сочетается с вспомогательной вогнутой сферической поверхностью, а схема в целом собирает пучок лучей в некотором фокусе, где мы и осуществляем контроль с помощью метода Фуко.

Понятно, что метод Фуко потребовал дальнейших усовершенствований и видоизменений, расширяющих области его применения и повышающих его чувствительность. Но то основное, что дал Фуко в первоначальном виде почти сто лет тому назад, заключало в себе уже так много и обладало такими потенциальными возможностями, что все последующие усовершенствования метода Фуко (теневое metodo) должны

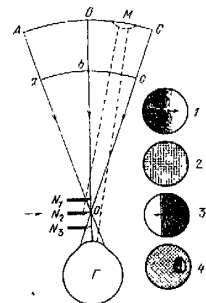


Рис. 59.

быть отодвинуты далеко на второй план по отношению автора этого замечательного метода.

Принципиальная сущность метода Фуко изображена на рис. 59. Здесь  $ABC$  - фронт сферической волны, имеющий своим центром (фокусом) точку  $O$ . Радиусы  $AO$ ,  $BO$ ,  $CO$  являются лучами в представлении геометрической оптики. Такая волна может иметь место и при отражении пучка лучей от вогнутого сферического зеркала, если светящаяся точка находится вблизи его центра кривизны, и при отражении параллельного пучка от

параболического зеркала, и при преломлении гомоцентрического пучка в объективе с исправленной сферической аберрацией.

Расположим наш глаз  $G$  за центром  $O$  и так близко от него, чтобы, при данной угловой апертуре пучка ( $\angle AOB$ ), зрачок глаза воспринял весь пучок лучей. В таком случае глаз увидит равномерно освещенный фронт волны под углом, весьма близким к двойному апертурному углу. Ничто не мешает нам мысленно совместить этот фронт с одной из реальных поверхностей исследуемой системы, так как любой другой фронт  $abc$ , имеющий центр в той же точке  $O$ , представится для глаза в том же виде, что и фронт  $ABC$ .

Возьмем непрозрачный экран  $N$  с ребром, отшлифованным в виде лезвия ножа («нож Фуко»), расположим его вблизи центра  $O$ , ориентируем его лезвие перпендикулярно плоскости рисунка и будем перемещать нож в направлении, указанном на рисунке стрелкой, наблюдая фронт волны глазом в прежнем положении. При движении ножа в положении  $N_1$  наступит такой момент, когда наблюдатель обнаружит первое появление тени на левом краю фронта вблизи точки  $A$ ; дальше тень будет передвигаться по фронту слева направо, т. е. в направлении движения ножа, пока не исчезнет последний луч  $CO$ , идущий через точку  $O$  к глазу и перекрываемый стоящим на пути ножом  $N_1$ . Картина 1 рис. 59 соответствует, очевидно, моменту, когда лезвие ножа коснулось оптической оси  $BO$ : левая половина фронта черная, правая светлая. Перенесем нож в положение  $N_2$  и снова будем перемещать его в направлении той же стрелки (слева направо); при этом тень впервые появится справа возле точки  $C$  и начнет распространяться влево, т. е. навстречу движению ножа (картина 3), пока фронт волны не померкнет вместе с последним лучом  $AO$ , перекрытым ножом.

Заметим, что в рассмотренном случае сферической волны (сходящегося гомоцентрического пучка) граница света и тени прямолинейна и параллельна лезвию ножа.

Поместим, наконец, нож в плоскость центра  $O$  в положение  $N_2$ . Рассуждая геометрически, мы должны ожидать, что пока лезвие ножа не коснулось точки  $O$  — фронт волны равномерно и ярко освещен; но стоит теперь переместить нож в направлении стрелки на ничтожно малую величину и перекрыть точку  $O$ , как каждый из лучей окажется перекрытым ножом в точке  $O$ , а фронт волны мгновенно и по всей поверхности погаснет для глаза наблюдателя.

В действительности  $O$  не математическая точка, а некоторая площадка копейной, хотя бы и очень малой величины; даже если естественная или искусственная звезда могут быть практически приравнены точкам, то их изображения в  $O$  представляются в виде дифракционной картины, т. е. перестают быть точечными. Поэтому, при ноже в положении  $N_2$  не может происходить мгновенного перекрытия всех лучей, идущих к глазу, но требуется передвижение ножа на величину поперечника  $O$ ,

хотя бы и очень малую. Фронт волны гаснет не мгновенно, а лишь очень быстро и, что для нас важно, равномерно по всей поверхности\*). Этот случай изображен на картине 2 в виде полутени, покрывающей фронт волны в момент соприкосновения лезвия ножа с оптической осью в точке  $O$ .

Изложенные сейчас соображения дали нам право и на двух предыдущих картинах (1 и 3) изобразить границу света и тени в виде полосы постепенного перехода от света к темноте; в действительности на этой границе удастся наблюдать дифракционные полосы, если только чувствительность установки для исследования достаточно высока.

Допустим, что в общем сферический фронт волны ( $ABC$ ) имеет некоторую местную деформацию  $M$  (бугорок на рис. 59); изобразим две нормали (два луча) к этому деформированному участку, из которых одна пройдет левее, а другая — правее точки  $O$ .

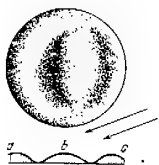
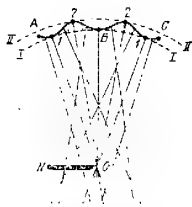


Рис. 60.

Поставим нож в «чувствительное положение», т. е. в положение  $N_2$ , и будем наблюдать картину 4 фронта волны с местной деформацией. Как и на картине 2, фронт волны представится нам в виде полутени, за исключением участка  $M$ , у которого правая часть окажется светлой, а левая — темной, так как лучи от правой половины бугорка проникают в глаз, минуя нож, а лучи от левой половины задерживаются ножом. В этом случае глаз увидит, как говорит, «теневую картину» отклонений волнового фронта от сферы. По контрасту теней и по их контурам мы можем оценить величину местной деформации  $M$  и определить ее протяженность и расположение на волновом фронте. Теперь становится понятным, почему метод Фуко, как и его видоизменения, нередко называется «теньевым методом».

Наличие у оптической системы остаточной сферической аберрации, а также приобретенные в процессе шлифовки и полировки зональные ошибки поверхностей, приводит к тому, что фронт волны приобретает деформации, имеющие симметрию относительно оптической оси  $BO$ ; такие зональные деформации фронта изображены на рис. 60. Здесь фронт волны  $ABC$  является поверхностью вращения вокруг оси  $BO$ , но поверхность, от-

\*) Ради простоты описания мы умалчиваем о дифракционном свечении внешней зоны волнового фронта.

личной от сферы. Заклучим волновой фронт между двумя концентрическими сферами с центром в  $O$  и выберем эти сферы так, чтобы расстояние между ними оказалось наименьшим из возможных для данного фронта волны. Эти сферы  $I-I$  и  $II-II$  показаны на рисунке прерывистой линией и называются *ближайшими сферами сравнения* для данного волнового фронта.

Приняв за ближайшую сферу сравнения сферу  $I-I$ , мы непосредственно получаем волновые aberrации ( $h_n$ ), как отступления фронта  $ABC$  от сферы  $I-I$  на соответственных зонах ( $y$ ). В нашем случае кривая волновых aberrаций имеет максимумы (равные нулю) при вершине  $B$  и на зоне  $I-I$  и минимум на зоне  $2-2$ ; из рис. 60 видно, кроме того, что нормали (лучи) в точках максимумов и минимумов кривой проходят через центр  $O$  сферы сравнения.

Поместив нож Фуко  $N$  в плоскости центра  $O$ , мы тем самым выбрали и сферу сравнения с центром  $O$ , т. е. в нашем случае ближайшую сферу сравнения. Если бы нож Фуко  $N$ , находился в плоскости какой-то другой осевой точки  $O_1$  (рис. 61), являющейся центром сферы сравнения  $III-III$ , то фронт волны  $ABC$  оказался бы заключенным между сферами  $III-III$  и  $IV-IV$ , а волновые aberrации, заштрихованные на рис. 61, оказались бы большими, чем в случае рис. 60, как большим оказалось и расстояние между сферами  $III-III$  и  $IV-IV$  по сравнению с расстоянием между сферами  $I-I$  и  $II-II$ . Таким образом, сферы с центром  $O$  являются действительно *ближайшими* к фронту волны сферами сравнения.

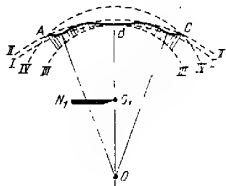


Рис. 61.

Возвращаемся к рис. 60. Приведя нож  $N$  в соприкосновение с центром  $O$  и расположив глаз непосредственно за точкой  $O$ , мы будем наблюдать изображенную на рисунке тепевую картину, так как одни лучи (нормали к волновому фронту) окажутся вполне перекрытыми ножом, другие лучи свободно проникают в глаз, проходя правее лезвия ножа, а третьи лучи устремляются в точности на лезвие ножа, облучая соответственные участки тепевой картины в полутени.

Прежде всего мы видим, что тепевая картина волновых aberrаций, имеющих осевую симметрию, лишена этой осевой симметрии: зона, представляющаяся черной в правой половине тепевой картины, оказывается светлой в ее левой половине и наоборот.

Одна половина тепевой картины является как бы негативом другой своей половины, и если мысленно разрезать тепевую картину по вертикальному диаметру (по диаметру, параллельному лезвию ножа), а затем сложить обе половинки и рассмат-



ривать их «на просвет», то вместо теневой картины мы должны увидеть приблизительно монотонно-темный полукруг.

Далее мы видим, что зоны, для которых точка  $O$  является точкой пересечения нормалей волнового фронта, представляются в виде полутеней; в нашем случае будет два полутеневых кольца на зонах  $1-1$  и  $2-2$  и полутеневой участок в центре  $B$  волнового фронта.

Наконец, чувствительность тепевого метода максимальна для диаметра фронта, перпендикулярного к лезвию ножа, и падает по спускоидальному закону с изменением наклона диаметра, обращаясь в нуль для диаметра, параллельного лезвию ножа. Поэтому вертикальный диаметр теневой картины в нашем случае будет представляться также в виде полутени, независимо от величины волновых aberrаций в отдельных его точках.

Тепловая картина позволяет очень наглядно интерпретировать волновые aberrации. Для этого следует представить себе теневую картину в виде некоторого воображаемого рельефа, освещенного косыми лучами, падающими в направлении «на лезвие ножа». Такой *теневой рельеф*  $abc$  представлен внизу рис. 60; он, очевидно, отнесен к сфере сравнения  $II-II$  и представляется в виде центрального бугра  $b$ , окруженного глубокой кольцевой канавкой, скаты которой затем после зоны  $2-2$  снова поднимаются до уровня  $b$  на зоне  $1-1$ , а затем опускаются, но не на полную глубину канавки, для крайних точек  $a$  и  $c$ . Если бы мы имели на местности такой топографический рельеф, освещенный косыми лучами заходящего солнца, то он представился бы нам с птичьего полета в том же виде, что и тепловая картина рис. 60. При отсутствии качественного различия мы имели бы существенное количественное различие: теневой рельеф обнаруживается, когда волновые aberrации изморяются сотыми долями световой волны.

Кроме того, следует помнить, что для топографического рельефа поверхностью сравнения является горизонтальная плоскость\*), тогда как для тепевого рельефа такой поверхностью является сфера сравнения, т. е. сфера, в центре которой находится нож Фуко в данный момент.

Так как положений ножа и сфер сравнения может быть бесчисленное множество, то и тепловой рельеф может принимать различные виды у одного и того же фронта волны в зависимости от положения ножа; с этим мы уже отчасти познакомились из сопоставления рис. 60 и рис. 61. Для устранения произвола мы будем выбирать некоторые специфические сферы сравнения, и таких сфер сравнения можно указать две: 1) уже известная нам *ближайшая* сфера сравнения  $I-I$  (или в некоторых случаях сфера  $II-II$ ) и 2) сфера сравнения, имеющая ту же кривизну, что и волновой фронт при своей вершине  $B$ .

\*) Вернее, элемент поверхности геоида с радиусом кривизны около 6400 км.

Последнюю сферу обозначим  $O-O$  и изобразим ее на рис. 62 совместно со сферой  $I-I$  и с соответствующими волновыми aberrациями.

Мы знаем, что все сферы сравнения с данным центром кривизны  $O$  равноправны; поэтому можно некоторую сферу сравнения  $MN$  для фронта  $ABC$  перенести в положение  $M'N'$  для соответственно переместившегося фронта  $A'B'C'$  (рис. 63). При



Рис. 62.



Рис. 63.

таком приближении фронта к центру  $O$  поперечные размеры фронта соответственно сократились, но волновые aberrации не претерпели изменения своей величины: зональные возвышения и впадины сблизились и уменьшили свою ширину, но глубина впадин или высота возвышений остались прежними. Поэтому фронт волны и сферу сравнения можно отодвигать на любые расстояния от центра  $O$ , и, в частности, можно отнести фронт волны к входному или выходному лучу оптической системы, а в других случаях к той или иной вещественной поверхности линзы или зеркала.

Нам не должно удивлять такой произвол в выборе положения фронта и сферы сравнения, так как застывший в пространстве фронт волны не существует, но он перемещается со скоростью 300 000 км/с и мы только можем мысленно его зафиксировать в любом месте распространения световой волны.

Как по теневому рельефу мы судим о деформациях волнового фронта, так отсутствие теневого рельефа свидетельствует об отсутствии волновых aberrаций в пределах чувствительности примененного теневого метода исследования. Картина 2 на рис. 59 изображала отсутствие теневого рельефа, и такую картину оптики часто называют «плоским рельефом»; если этот термин режет ухо филолога, то он хорошо понятен и символичен для оптики: в этом случае фронт волны совпал со сферой сравнения, волновые aberrации, если и не равны нулю, то лежат за пределами чувствительности теневого метода, — и оптический идеал достигнут.

Возвратившись к рис. 59, расположим нож в  $N$ , и тем самым выберем сферу сравнения с кривизной большей, чем кривизна волнового фронта; в этом случае ( $I$ ) фронт волны представился в виде плавного выпуклого рельефа или общего бугра, освещенного косыми лучами, падающими в направлении на лезвие но-

жа. Переносим поик в  $N_2$ , выбрав сферу сравнения с кривизной меньшей, чем кривизна волнового фронта; в этом случае (3) тепловая картина представилась в виде общей плавной ямы. И только при поике в положении  $N_2$  наблюдается плоский рельеф: поик совпадает с центром  $O$  сферического волнового фронта, а значит, сфера сравнения совпадает с самой сравниваемой поверхностью. Это положение поика мы называем *чувствительным*, так как самые ничтожные местные и зональные ошибки волнового фронта в этом случае выявляются, тогда как те же или даже более грубые ошибки могут оставаться незамеченными при положениях поика в  $N_1$  или  $N_2$ , когда они попадают в область полной тени или полного света на тепловой картине; полоска же получения слишком узка, чтобы на ней можно было заметить позначительную деформацию волнового фронта. Имеется, правда, возможность обнаруживать деформации фронта по искривлению этой полутепловой границы между светлым и черным полями тепловой картины; но, во-первых, чувствительность такого способа недостаточно высока и, во-вторых, для этого нужно медленно перемещать границу света и тени от одного края тепловой картины до другого, внимательно наблюдая за малейшими подозрительными искривлениями пограничной полоски, а затем как-то измерять эти искривления и даже, если угодно, вычислить по ним форму волнового фронта.

Попробуем выяснить возможности теплового метода в смысле его предельной чувствительности. Для этого сперва рассмотрим вопрос в свете представлений геометрической оптики, затем, обнаружив несостоятельность таких представлений, обратимся к помощи физической оптики и, наконец, сопоставим наши приближенные выводы с тем, что дает эксперимент.

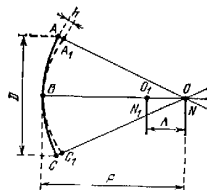


Рис. 64.

Пример 1 (рис. 64). Сферическая волна  $ABC$  с радиусом кривизны  $R$ , имеет своим центром кривизны точку  $O$ ; пусть  $R$  — радиус кривизны этой сферы; располагая в  $O$  поик  $N$ , мы должны наблюдать плоский тепловой рельеф. По практически такой же рельеф мы будем наблюдать и при дефокусировке поика на величину  $\Delta$ , когда  $N_1$  окажется в центре  $O_1$  сферы сравнения  $A_1B_1C_1$ ; при этом отступле-

ние сферы сравнения от волнового фронта достигает величины  $h$  для внешней зоны.

Спрашивается: при каком значении  $h$  мы сможем обнаружить первые признаки исчезновения плоского рельефа и появление намеков на тепловую картину, убеждающую нас, что сфера сравнения выбрана неправильно и не совпадает с фронтом волны? Наилучшая величина  $h_{min}$  и будет критерием предельной чувствительности метода.

Если принять источник света точечным, то в центре получится его изображение в виде точки, и мы сразу можем сказать, что представления геометрической оптики приведут к необходимости заключить, что чувствительность теневого метода бесконечно велика. Поэтому мы возьмем протяженный источник света и получим в фокусе его протяженное безаберрационное изображение, а затем применим теневой метод для наблюдения теневых картин в этом случае. Для удобства рассуждений возьмем прямоугольный источник равномерной яркости и получим в фокусе его изображение в виде прямоугольника с боковыми сторонами, строго параллельными лезвию ножа; пусть ширина этого прямоугольника равна  $ab$  (рис. 65), высота же его для нас безразлична.

Расположим нож  $N$  в плоскости изображения  $ab$  так, чтобы он перекрывал часть изображения, пропуская в глаз лучи от полоски изображения, имеющей ширину  $\delta$ ; в этом случае теневая картина представится для глаза в виде плоского рельефа с постоянной яркостью, пропорциональной ширине окна  $\delta$ . Переместим нож на величину  $\Delta$  из положения  $N$  в  $N_1$  и обнаружим, что теневая картина имеет наибольшую яркость для точки  $A$  и наименьшую для точки  $C$ , так как от точки  $A$  лучи проходят в глаз наблюдателя через окно  $\delta_A$ , а от точки  $C$  через окно  $\delta_C$ , но мы видим, что  $\delta_A > \delta_C$ ; нетрудно вычислить, что

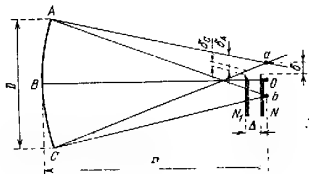


Рис. 65.

$$\delta_A \approx \delta + \frac{D\Delta}{2R}, \quad \delta_C \approx \delta - \frac{D\Delta}{2R} \quad (88)$$

Отсюда контраст  $\gamma$  для яркости картины в точках  $A$  и  $C$  выразится как:

$$\gamma = \frac{\delta_A \cdot \delta_C}{\delta_A} \approx \frac{2D\Delta}{2R\delta + D\Delta}, \quad (89)$$

откуда дефокусировка  $\Delta$  определяется в виде:

$$\Delta = \frac{2R\delta\gamma}{D(2 - \gamma)}. \quad (90)$$

Но так как предельно различимый контраст  $\gamma_0$  мал по сравнению с числом 2, то выражение (90) можно переписать для случая дефокусировки  $\Delta_{min}$ , при которой еще обнаруживаются различия в яркостях для точек  $A$  и  $C$  теневой картины, в виде:

$$\Delta_{min} \approx \frac{R\delta\gamma_0}{D}. \quad (91)$$



контраст  $\gamma$  определяется с использованием выражения (94), как:

$$\gamma = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \delta} - \frac{\alpha R}{\alpha R + \delta}. \quad (95)$$

В данном случае двух соприкасающихся полей постоянной, но различной яркости, разделенных прямолинейной границей раздела, предельно различимый контраст  $\gamma_0$  может достигать 1,5% припадающей, конечно, яркости теневой картины. Такому контрасту будет соответствовать некоторое минимальное значение угла  $\alpha_{\min}$ , при котором глаз наблюдателя еще способен установить наличие излома у волнового фронта. Из выражения (95) находим:

$$\alpha_{\min} = \frac{\gamma_0 \delta}{R(1 - \gamma_0)} \approx \frac{\gamma_0 \delta}{R}. \quad (96)$$

Углу  $\alpha_{\min}$  соответствует отклонение  $h_{\min}$  одного полуфронта от другого, если один из полуфронтов принять за сферу сравнения;  $h_{\min}$  следует брать для крайней точки деформированного полуфронта, где  $h_{\min}$  достигает наибольшего значения:

$$h_{\min} = \frac{\alpha D}{2}. \quad (97)$$

Поэтому из (97) и (96) получаем:

$$h_{\min} = \frac{\gamma_0 \delta}{2} \cdot \frac{D}{R}. \quad (98)$$

Например, при  $\delta = 0,04$  мм;  $\gamma_0 = 0,015$ ;  $D : R = 1 : 10$ , имеем:

$$h_{\min} = 0,0075 \text{ мкм.}$$

Беспрестанно уменьшая  $\delta$  или  $D : R$ , можно осуществить сколь угодно высокую чувствительность, что снова противоречит здравому смыслу и эксперименту. В этом противоречии виноваты не малые размеры световых окон, приводящие к низкой яркости теневой картины и малой контрастной чувствительности глаза: повышая в доступных для современной техники пределах поверхностную яркость источника света, можно пользоваться при исследовании весьма узкими светящимися целями и все же иметь еще достаточно яркую теневую картину, а глаз ставить в условия наблюдения при высокой контрастной чувствительности. В противоречии виноваты превратные представления геометрической оптики, не считающейся с физической природой световых явлений.

Пример 3. Рассмотрим предыдущий пример в свете элементарных представлений физической оптики, а для большей простоты и строгости выводов предположим, что сферический фронт волны ограничен двумя круглыми контурами  $A$  и  $C$  диаметра  $D$  (рис. 67), что он изломлен на угол  $\alpha$  по линии  $BB_1$ , параллельной лезвию ножа  $N$ , что в фокальной плоскости образовались два смещенных изображения  $a$  и  $c$  прямоугольной фор-

мы, что нож  $N$  движется в направлении стрелки и будет в дальнейшем перекрывать изображения  $a$  и  $c$  и что глаз расположен за лезвием ножа и наблюдает неравенство яркостей дисков  $A$  и  $C$ . Изображения  $a$  и  $c$  по-прежнему (94) оказываются сдвинутыми на величину

$$\varepsilon = \alpha R,$$

по правые границы этих изображений, интересующие нас в данном случае, не являются в действительности границами мгновенного перехода от света к темноте. Физическая оптика учит нас

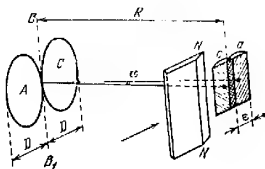


Рис. 67.

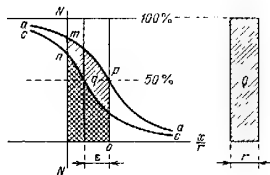


Рис. 68.

тому, что границы достаточно широкого прямоугольного изображения представляют собой постепенный переход от света к темноте, графически поясненный кривыми рис. 68. Кривые  $ama$  и  $cnc$  соответственно представляют собой освещенность вблизи правых границ изображений  $a$  и  $c$  (рис. 67). Эти кривые проходят через значение освещенности, равное 50% в тех местах, где ранее мы ожидали появления геометрических границ изображений; кривые сдвинуты друг относительно друга в горизонтальном направлении на величину  $\varepsilon$  (94). Нож Фуко  $N-N$  перекрывает яркие (левые) части дифракционной картины границ изображений и пропускает в глаз количества света, пропорциональные заштрихованной площади  $tra$  — для первой половины теневой картины ( $A$ ) и дважды заштрихованной площади  $nqc$  — для второй половины теневой картины ( $C$ ); заштрихованные площади необходимо продолжить вправо: теоретически — до бесконечности, а практически — достаточно далеко, например, на расстояние  $5r$  —  $10r$ , где  $r$  — единица горизонтального масштаба, равная радиусу дифракционного кружка (кружка Эри):

$$r = \frac{1.22\lambda R}{D}. \quad (99)$$

Здесь следует сделать существенную оговорку: пучки от полуфронтов волны  $A$  и  $C$  вообще способны интерферировать и тем самым усложнять картину изображений  $a$  и  $c$ . Но мы отвлечемся от интерференции двух пучков, предположив, например, что у пучков от  $A$  и от  $C$  имеется значительная разность хода лучей. Осуществить это можно следующим образом: заднафрагмировать

объектив диафрагмой с двумя отверстиями  $A$  и  $C$  и перед одним из них расположить пластинку оптического стекла достаточной толщины с плоскими, но не вполне параллельными поверхностями; теневой метод позволит в этом случае обнаружить «клины» у такой пластинки с чувствительностью, которую мы сейчас собираемся выяснить.

Но возвращаемся к рис. 67 и 68. Контраст  $\gamma$  определится, как разность яркостей участков  $A$  и  $C$ , деленная на яркость более яркого участка  $A$ . Так как эти яркости пропорциональны площадям  $mra$  и  $nqc$ , то:

$$\gamma = \frac{mra - nqc}{mra}. \quad (100)$$

Дифракционная теория\*) позволяет вычислить кривые  $ama$  и  $cnc$ , а потому мы можем определить и величину площадей  $mra$  и  $nqc$  для любого положения ножа  $N - N'$  и при любом значении величины смещения  $\varepsilon$ . Оказывается, что контраст  $\gamma$  проходит через максимальное значение, когда лезвие ножа приблизительно совмещено с правым краем геометрического изображения  $c$ , т. е. отстоит от правого края геометрического изображения  $a$  на величину смещения  $\varepsilon$ , и это почти независимо от значения  $\varepsilon$ .

Перекроем ли мы изображение слишком сильно ножом, или не достанем лезвие до геометрической границы изображения — контраст будет меньше, и мы инстинктивно перемещаем нож в нужное положение, когда тепловая картина представляется нам наиболее контрастной.

Для данного случая сравнения двух соприкасающихся полей постоянной, но не одинаковой яркости, и особенно, если заставить эти поля соприкасаться хотя бы по очень короткой хорде  $B - B'$ , — предельно различимый контраст  $\gamma_0$  может достигать 2% и даже 1,5%.

Приняв  $\gamma_0 = 2\%$ , мы вычисляем, что такой контраст достигается, когда:

$$\varepsilon \approx \frac{r}{80} = \frac{0.015\lambda R}{D}. \quad (101)$$

Поэтому на основании (94) имеем:

$$\alpha_{\min} = \frac{0.015\lambda}{D}. \quad (102)$$

Но так как в нашем случае:

$$h_{\min} = \alpha D, \quad (103)$$

то:

$$h_{\min} = 0,015\lambda. \quad (104)$$

Этот вывод говорит прежде всего о том, что предельная чувствительность теплового метода очень высока: она в данном при-

\*) *Максудов Д. Д.* Астрономическая оптика, ч. I, § 4.



мере в  $\sim 17$  раз выше допуска Рэлея  $\left(\frac{1}{4}\lambda\right)$ , и метод способен с избытком обеспечить изготовление и контроль оптики самой высшей точности. Далее мы видим, что чувствительность метода никак не связана ни с относительным отверстием пучков ( $D:R$ ), ни с шириной изображений  $a$  и  $c$ , которая может быть сколь угодно большой. Пакопец, в выражение (104) не входит степень перекрытий изображений  $a$  и  $c$  пожом Фуко, так как оптимальное перекрытие осуществляет подсознательно сам наблюдатель, добиваясь наиболее контрастной теневой картины.

В нашем выводе не учтена яркость тепловой картины и связанное с яркостью изменение контрастной чувствительности глаза. Этот вопрос следует рассмотреть более подробно. Введем следующие обозначения:  $B$  — яркость источника света;  $K$  — коэффициент пропускания исследуемой оптической системы;  $d$  — диаметр зрачка глаза. Допустим, что изображения  $a$  и  $c$  (рис. 67) и по высоте и по ширине превышают диаметр глазного зрачка. В этом случае глаз, расположенный в плоскости изображений  $a$  и  $c$  и при отведении в сторону поже Фуко, оценит яркость участков  $A$  и  $C$  равной  $KB$ . Приведем пож Фуко в положение, когда он касается правой, геометрической границы одного из изображений; а так как смещение  $\epsilon$  очень мало (при малых контрастах), то практически безразлично, о каком из двух изображений ( $a$  или  $c$ ) мы будем говорить. В этом случае (рис. 68) в глаз наблюдателя попадет количество света, определяемое площадью  $pa...op$ ; площадь же  $pa...op$  равновелика прямоугольнику  $Q$ , высота которого лежит на уровне 100%, т. е. соответствует яркости  $KB$ , а ширина  $l$ , как показывает вычисление, равна:

$$l \approx 0,28r \approx \frac{0,34\lambda R}{D}. \quad (105)$$

Итак, на зрачок глаза как бы проектируется щель высотой равной диаметру  $d$  зрачка и шириной, равной  $l$  (105). Заполнение зрачка оказывается не полным, а частичным; площадь же  $ld$  меньше площади глазного зрачка в  $n$  раз, причем:

$$n = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) : ld = \frac{2,3dD}{\lambda R}. \quad (106)$$

Во столько же раз и кажущаяся яркость  $B$ , тепловой картины будет меньше яркости  $KB$ , т. е.:

$$B_T = 0,43 \frac{\lambda B \lambda R}{dD}. \quad (107)$$

Составим по выражению (107) таблицу 18 величины  $B_T$  для нескольких значений относительного отверстия пучка ( $D:R$ ) и для двух значений яркости источника света: 1)  $B = 200$  сб, что близко к случаю теплового прибора с электрической лампочкой типа автомобильной с учетом потерь света в тепловом приборе и спиральной формы волосков лампы и 2)  $B = 20\,000$  сб, которые

можно получить от специальных источников света; для коэффициента пропускания  $k$  примем три значения: 1)  $k = 1$ , что близко к случаю исследования объективов и посеребренных или алюминированных зеркал; 2)  $k = \frac{1}{20}$  — случай исследований при одной несеребряной стеклянной поверхности; 3)  $k = \frac{1}{400}$  — случай исследований при двух «стеклянных» отражениях. Для длины волны примем  $\lambda = 0,555$  мкм, так как ей соответствует максимальная чувствительность глаза; для диаметра зрачка примем  $d = 4$  мм, что вполне правдоподобно при наблюдении тепловых картин умеренной яркости.

Т а б л и ц а 18

$[B_m = \varphi(k, B, D : R); \text{ при } d = 4 \text{ мм, } \lambda = 0,555 \text{ мкм}]$

| Яркость                       | $D:R$               | 1:1                          | 1:3                          | 1:10                         | 1:30                         |
|-------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $B = 200 \text{ сБ}$          | $k = 1$             | $1,2 \cdot 10^{-3}$<br>(1,7) | $3,6 \cdot 10^{-3}$<br>(1,7) | $1,2 \cdot 10^{-1}$<br>(1,8) | $3,6 \cdot 10^{-1}$<br>(2,0) |
|                               | $k = \frac{1}{20}$  | $6 \cdot 10^{-4}$<br>(1,9)   | $1,8 \cdot 10^{-3}$<br>(1,8) | $6 \cdot 10^{-3}$<br>(1,7)   | $1,8 \cdot 10^{-2}$<br>(1,7) |
|                               | $k = \frac{1}{400}$ | $3 \cdot 10^{-5}$<br>(3,9)   | $9 \cdot 10^{-5}$<br>(2,8)   | $3 \cdot 10^{-4}$<br>(2,1)   | $9 \cdot 10^{-4}$<br>(1,8)   |
| $B = 20\,000 \cdot \text{сБ}$ | $k = 1$             | 1,2<br>(2,3)                 | 3,6<br>(2,8)                 | 12                           | 36                           |
|                               | $k = \frac{1}{20}$  | $6 \cdot 10^{-2}$<br>(1,8)   | $1,8 \cdot 10^{-1}$<br>(1,9) | $6 \cdot 10^{-1}$<br>(2,0)   | 1,8<br>(2,5)                 |
|                               | $k = \frac{1}{400}$ | $3 \cdot 10^{-3}$<br>(1,7)   | $9 \cdot 10^{-3}$<br>(1,7)   | $3 \cdot 10^{-2}$<br>(1,7)   | $9 \cdot 10^{-2}$<br>(1,8)   |

Каждому значению  $B_r$  соответствует некоторый предельно различимый контраст  $\gamma_0$ , который мы приводим в таблице, выразив его в процентах и заключив в скобки; значения  $\gamma_0$  взяты по Nutting'у.

Как мы видим, даже при тепловом приборе со скромной автомобильной лампочкой, при относительном отверстии пучка 1:1 и при двух отражениях от несеребрянных зеркал — кажущаяся яркость тепловой картины не так уж мала ( $B_r = 3 \cdot 10^{-5}$  сБ) и позволяет использовать глаз при еще достаточно высокой контрастной чувствительности  $\gamma_0 = 3,9\%$ . При  $B = 20\,000$  сБ и при  $k = 1$  (и даже  $k = \frac{1}{20}$ ) яркость тепловой картины чрезмерно велика и является вредной и излишней, так как снижает контрастную чувствительность глаза; и только при двукратном отражении лучей от стеклянных поверхностей стоит применять в тепловом приборе специальные источники света повышенной яркости.

Наши выводы претендуют, конечно, лишь на приблизительную оценку контрастной чувствительности глаза при наблюдении теневых картин, так как, прежде всего, сама кривая контрастной чувствительности приближена и субъективна, и так как понеречники глазного зрачка могут заметно отклоняться от принятого нами значения  $d = 4$  мм.

Но мы убеждаемся, что ранее принятое нами значение предельно различимого контраста  $\gamma_0 = 2\%$  выбрано нами правдоподобно и соответствует большинству реальных случаев теневых исследований.

Поэтому и найденная нами предельная чувствительность теневого метода ( $h_{\min} \sim 0,015\lambda$ ) недалеко от истины. Во всяком случае эксперимент подтверждает это утверждение.

Но предельную чувствительность теневого метода можно повысить еще приблизительно в 3 раза, доведя ее до  $h_{\min} \sim 0,005\lambda$ . Для этого следует, рассуждая теоретически, заменить протяженное световое окно бесконечно тонкой светящейся щелью; рассуждая же практически, следует применять в теневом приборе не широкие, а достаточно узкие щели, приближающиеся по ширине к размерам дифракционного кружка. Для этого случая можно вычислить и построить кривые, аналогичные кривым рис. 68, и показать, что те же контрасты  $\gamma$  имеют место, когда смещение  $\epsilon$  делается приблизительно в 3 раза меньшим.

Для практического использования высшей чувствительности теневого метода, на которую он потенциально способен, необходимо соблюдение следующих условий.

Световое окно (светящаяся щель в теневом приборе) должно иметь точно выполненную прямолинейную границу, чтобы она, в своем изображении через исследуемую систему, могла точно совпасть с лезвием ножа, выполненным столь же точно. Малейшие зазубрины и ошибки на границе окна или на лезвии ножа приводят к тому, что в отдельных точках лезвие ножа не перекрывает изображения щели при оптимальных условиях перекрытия, а тевая картина получает дополнительную вредную подсветку и проигрывает в контрастности.

Кроме того и по той же причине, лезвие ножа следует устанавливать строго параллельно границе изображения щели, причем требуется строгая параллельность пространственная, а не в какой-либо одной только проекции. Говоря более просто, мы добиваемся такой установки ножа, при которой он одновременно перекрывает верх и низ щели (а значит и всю щель) и, кроме того, наклонен к оптической оси на тот же угол, на который наклонено и изображение щели (в частном случае и нож и изображение щели перпендикулярны оси системы).

Допустимые зазубрины, непрямолинейность и ошибки установки ножа на параллельность с изображением щели связаны с масштабом структуры дифракционного изображения; масштаб же структуры дифракционного изображения зависит от относительного отверстия пучка ( $D:R$ ): чем светосильнее исследуемая сп-

стема, тем более строгие требования предъявляются к качеству изготовления пожа и щели и к точности установки пожа на изображение щели. Поэтому неудивительно, что грубо изготовленный или успевший износиться теневой прибор пригоден для высокочувствительного исследования систем малой светосилы и оказывается неудовлетворительным для такого же исследования светосильных и сверхсветосильных систем.

Глаз должен наблюдать тепевую картину в условиях высокой контрастной чувствительности, а потому яркость источника света следует подбирать так, чтобы при оптимальном перекрытии изображения щели пожом кажущаяся яркость тепевой картины не слишком выходила за пределы яркостей от  $\sim 10^{-4}$  стильба до  $\sim 1$  стильба. При широких щелях это условие удовлетворяется в большинстве практических случаев в теневых приборах с обыкновенной автомобильной лампой или с ртутной дугой несколько повышенной интенсивности. При очень узких щелях («дифракционной» ширины), когда у нас появляется возможность почти утроить чувствительность теневого метода, а также при многократных отражениях лучей от несеребрянных стеклянных поверхностей, желательно применение источников света повышенной яркости, а наилучшим таким источником света следует признать ртутную дугу высокого и сверхвысокого давления: она очень компактна, экономична, горит достаточно ровно и позволяет до известного предела использование монохроматического света для исследования хроматизма линзовых объективов.

Глаз наблюдателя должен быть адаптирован на соответствующую яркость теневой картины. В этом смысле широкие щели оказываются вредными или, точнее, менее полезными, чем мы ожидаем: пока пож не перекрыл почти полностью изображения такой щели, в глаз попадает слишком много света, и к моменту наблюдения теневой картины глаз не успеет адаптироваться на малые яркости; кроме того, когда достигнуто надлежащее перекрытие изображения пожом, и мы наблюдаем сравнительно бледную тепевую картину, — все пылинки на поверхности изделия или пузыри в его толще продолжают ярко светиться, конкурируя с яркостью теневой картины, так как они засвечены по-прежнему от широкой щели, глаз же воспринимает тепевую картину за счет лучей от узкой ленточки возле границы изображения.

Глаз должен быть аккомодирован или вооружен очками так, чтобы контуры теневой картины не распылялись, а мелкие местные и зональные ошибки волнового фронта могли быть обнаружены.

Установка для исследования должна покоиться на солидном фундаменте, не принимающем участия в неизбежных вибрациях пола лаборатории. В противном случае изображение щели будет вибрировать относительно лезвия пожа (особенно в схемах исследования, включающих в себя зеркала), условие оптимального перекрытия изображения щели пожом будет периодически нарушаться, и на такой усредненной тепевой картине мы обнару-

жним снижением контрастности, хотя, может быть, и не заметим при этом пульсаций света, если период вибраций достаточно мал. В результате мы потеряем в чувствительности.

Наконец, при тепловых исследованиях необходимо обеспечить высокую однородность воздуха на пути лучей. Конвекционные потоки воздуха (от тела и дыхания наблюдателя, от печей или радиаторов, от лампы тепевого прибора, от плохо закрытого окна или двери), проходя на пути лучей, могут в сильнейшей степени исказить тепевую картину. Так, поместив на пути лучей руку, мы будем наблюдать волнующуюся тепевую картину, а над кон-турами пальцев — контрастную тепевую картину потоков струй более теплого воздуха; поместив между испытуемым паделем и пожом Фуко тлеющую папиросу, мы увидим картину, которую образно можно уподобить извержению вулкана.

Чувствительность тепевого метода настолько высока, что пук-но обставляя исследование с особой тщательностью. Действи-тельно, при узких щелях можно ожидать чувствительности, близи-кую к  $h_{\min} \sim 0,005\lambda$ , т. е. в 50 раз ббльшую, чем это требуется для первоклассных оптических систем, удовлетворяющих усло-вию Рэлея. Такая или близкая к ней чувствительность подтверж-дается опытом и объясняет многие недоуменные вопросы, вроде следующего: почему тепевой метод обнаруживает зональные ошибки и наличие кривизны у плоских зеркал, изготовленных наиболее квалифицированными оптиками, пользовавшимися при их исследовании интерферометрическим методом (метод пробного стекла) и не обнаружившими у зеркал никаких ошибок? Объяс-нение заключается в различии чувствительности этих двух мето-дов, и это различие оказывается в пользу тепевого метода.

Оптик, исследующий поверхность под пробное стекло, уверен-но улавливает ошибку поверхности в  $\sim \frac{1}{4}$  интерференционной полосы, т. е. в  $\sim \frac{1}{8}\lambda$ , и то лишь при условии, что наблюдаемых колец интерференции очень мало (1—2 кольца); чтобы обнару-жить ошибку в  $\frac{1}{10}$  полосы ( $\frac{1}{20}\lambda$ ), необходимо не только иметь исключительно опытного наблюдателя, но и осуществить почти полное равенство кривизн изделия и пробного стекла, т. е. вместо колец наблюдать почти прямые полосы интерференции, слегка деформированные ошибками поверхности. Оптик, владеющий те-певыми методами исследования, без труда и особых ухищрений обнаруживает деформацию волнового фронта в  $\frac{1}{20}\lambda - \frac{1}{30}\lambda$ , т. е. ошибку на отражающей поверхности в  $\sim \frac{1}{40}\lambda - \frac{1}{60}\lambda$ , а при высо-кой квалификации мастера и тщательно поставленном эксперимен-те — в  $\sim \frac{1}{100}\lambda$ , т. е. ошибку поверхности в  $\sim \frac{1}{200}\lambda$ .

Проме того, следует помнить, что в методе пробного стекла сама поверхность пробного стекла может иметь ошибки поверх-

пости порядка  $\frac{1}{10} \lambda$ , тогда как во многих случаях теневых исследований, например, при исследовании вогнутого сферического зеркала, мы не пользуемся вспомогательными оптическими поверхностями, а непосредственно наблюдаем ошибки самой исследуемой поверхности; в этом случае найденное преимущество теневого метода перед методом пробного стекла следует удвоить.

Но при нашем исследовании мы не учитывали дифракции лучей на лезвии ножа, что несколько снижает предельную чувствительность теневого метода. Поэтому с некоторой осторожностью мы указали предельную чувствительность равной  $\sim \frac{1}{100} \lambda$  для волнового фронта и  $\sim \frac{1}{200} \lambda$  для одиночной зеркальной поверхности,

вместо вычисленных ранее  $\sim \frac{1}{200} \lambda$  и  $\sim \frac{1}{400} \lambda$  (соответственно). Эксперимент подтверждает во всяком случае, что мы не преувеличиваем достоинств теневого метода.

Очень сложный вопрос о предельной чувствительности теневого метода ждет еще своего настоящего исследователя — теоретика. Мое исследование, не претендуя на полноту, позволяет будущим исследователям поставить задачу более строго, намечает правильный путь для ее решения и уничтожает некоторые ошибочные представления в данном вопросе.

При описании теневого метода в качестве светового окна мы использовали щель, а не точку, как это было в действительности в первоначальном методе Фуко. Замену точки щелью я предложил и впервые применил в 1921 г.\*); до этого времени в оптических исследованиях по методу Фуко, насколько это мне известно, применялись повсеместно точки, если не считать метода Тенлера, в котором искровой разряд по необходимости имитировал щель; при этом специально не преследовалась рассмотренная ниже щель.

Щель выгоднее точки по двум причинам: 1) при той же ширине, что и диаметр точки, и при той же степени перекрытия ножом щель посылает в глаз значительно большие количества световой энергии, а потому теневая картина представляется в десятки и в сотни раз более яркой; 2) в случае точки на сетчатку глаза проектируются узкие пучки, а оптические неоднородности хрусталика при такой «точечной проекции» создают дополнительную теневую картину (подвижную при движении глаза наблюдателя), налагающуюся на основную картину и искажающую ее; в случае щели теневая картина неоднородностей хрусталика в сильной степени сглажена и растушевана, и мы практически не чувствуем от нее помех.

Прежде (до 1939—1940 г.) я предполагал, что чувствительность теневого метода, если не пропорциональна, то во всяком

\*) *Максудов Д. Анаберрационные отражающие поверхности...* — Труды ГОИ, 1932, вып. 86, с. 88.

случае в значительной мере зависит от ширины щели или от диаметра точки. Теперь, на основании изложенных выше соображений, от этого взгляда следует отказаться, как от принципиально неверного. Чувствительность, в первую очередь, зависит от степени перекрытия дифракционной границы изображения щели (или точки) полком Фуко; будет ли щель бесконечно широкой или шириной 1 мм, дифракционная граница ее изображения практически не изменит своего характера, и только при весьма узких щелях, конкурирующих с толщиной структуры самого дифракционного изображения, получается более крутая кривая перехода от света к тени на границе изображения; большая крутизна этой кривой способствует большей чувствительности тепевого метода, но при переходе от бесконечно широкой щели к бесконечно узкой мы обнаруживаем выигрыш в предельной чувствительности всего лишь в  $\sim 3$  раза.

Все, что было сказано о влиянии ширины щели на условия адаптации глаза и на свечение пылинки, царапин и пузырей у изделия, является второстепенным, не принципиальным и теоретически устранимым.

Рассмотрим вопрос, почему все же чувствительность теплового метода заметно повышается, когда точка заменена щелью? Для этого обратимся к рис. 69, на котором нож  $NN$  перекрывает

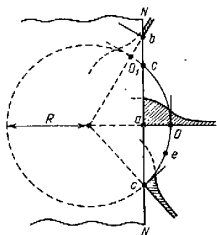


Рис. 69.

ния следует брать в качестве оси абсцисс соответственный радиус точечного изображения и на нем уже строить кривую распределения освещенности, как это пояснено на рис. 69. Так, для точки  $a$ , лежащей на лезвии ножа и на горизонтальном радиусе точечного отверстия, перекрытие изображения ножом не будет оптимальным, так как точка  $a$  лежит левее геометрической границы  $O$ ; и хотя от заштрихованной площадки в глаз попадает много света, но тепловая картина представляется мало контрастной. Для точки  $b$  мы имеем обратный случай чрезмерного перекрытия изображения ножом, так как точка  $b$  лежит вне геометрической границы  $O$ ; точечного изображения; здесь мала и яркость тепловой картины и ее контрастность.

Условие оптимального перекрытия изображения пожом осуществлено только для двух точек  $c$ , но обусловленная этими точками высококонтрастная теневая картина тонет на фоне яркой и малококонтрастной теневой картины от сегмента  $coss$ : при показанном на рисунке положении пожа теневая картина представляется глазу достаточно яркой, но малококонтрастной.

Для достижения высокого контраста следует переместить пож  $NN$  вправо так, чтобы его лезвие проходило через точку  $O$ , т. е. касалось геометрической границы точечного изображения. Но в этом случае суммарное количество света, проникающего сирова от лезвия пожа и попадающего в глаз наблюдателя, будет очень малым, теневая картина будет обладать незначительной яркостью, а глаз, быть может, будет поставлен в условия наблюдения при пониженной контрастной чувствительности.

Кроме того, и контраст теневой картины будет меньшим, чем в случае целевидного изображения, так как при новом положении пожа точка  $a$ , совмещенная с точкой  $O$ , приобрела свойства точек  $c$ , но некоторая точка  $e$  обладает теми же свойствами. какими обладала точка  $b$  и снижает контраст теневой картины. Вот почему чувствительность теневого метода при точечном отверстии принципиально должна быть ниже, чем при отверстии целевидном.

Но и в случае точечного отверстия можно заметно повысить чувствительность теневого метода: для этого нужно поставить все точки контура изображения в одинаковые условия перекрытия, именно, в условия оптимального перекрытия. Как это сделать?

Вместо пожа следует взять круглый непрозрачный экран, по диаметру равный диаметру геометрического изображения точки; такой «черной точкой» мы будем закрывать изображение светящейся точки и наблюдать своеобразную в этом случае и достаточно яркую и контрастную теневую картину.

Этот «метод точки и точечного экрана» был мною предложен, успешно проверен и описан в отчетах ГОИ (1932—1933 гг.); недостатками метода являются: 1) повышенные требования к точности выполнения светящейся точки и точечного экрана и 2) необходимость тщательного совмещения точечного экрана с изображением точки, причем совмещения по трем координатам.

Хотя чувствительность «метода точки и пожа» и ниже чувствительности «метода щели и пожа», но она еще достаточно высока для исследований первоклассной оптики и, кроме того, может быть несколько повышена при применении очень малых точек, конкурирующих по размеру со структурой дифракционного изображения; конечно, в этом случае следует пользоваться теневыми приборами с источниками света очень высокой поверхностной яркости, чтобы поставить глаз в условия наблюдений при достаточно высокой контрастной чувствительности.

В некоторых случаях исследований применение точки вместо щели оказывается вообще более выгодным; к таким случаям



прежде всего принадлежит исследование астигматизма, а также исследование кривизны «плоских» поверхностей.

Хотя и в этих случаях можно пользоваться методом щели, предусмотрев возможность устанавливать нож и щель под любым углом к горизонту, однако, выиграв в чувствительности фокусировки ножа, мы в конечном счете можем потерять в точности измерения из-за случайных смещений плоскости ножа и плоскости изображения во время вращения ножа и щели. Но вопрос исследования плоскостей мы рассмотрим более подробно в своем месте.

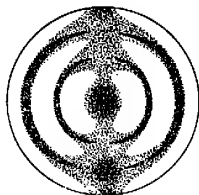


Рис. 70.

метода щели и нити» в трудах ГОИ (1932, вып. 86, с. 92—93).

Теневая картина в моем первом методе щели и нити представляется в следующем виде: зоны, в точках пересечения порамалей которых находится в данный момент нить, представляются темными; темным же представляется диаметр теневой картины, параллельный нити; чувствительность метода и контрастность теневой картины по-прежнему изменяются по синусоидальному закону для диаметров теневой картины различного наклона. Поэтому теневая картина волнового фронта (см. рис. 60), при замене ножа ( $N$ ) нитью представится так, как это схематически изображено на рис. 70. Здесь чувствительность максимальна для диаметра, перпендикулярного щели и нити, и равна нулю для диаметра, им параллельного.

Для каждого диаметра теневой картины теневая картина имеет осевую симметрию при условии, что фронт волны представляет собой поверхность вращения вокруг оптической оси.

При такой симметричности теневой картины мы получаем возможность более уверенно устанавливать нить на фокус избранной зоны, а также очень чувствительно определить момент прохождения центра нити через оптическую ось испытуемой волновой поверхности, так как малейшее смещение центра нити с оптической оси вызывает нарушение симметрии левой и правой половин теневой картины. Последнее соображение позволило мне в свое время предложить новый высокочувствительный метод совмещения нити (например в гониометре) с изображением щели (например спектральной линии).

\*) То есть на 3 года ранее появления метода Ронки.

Выведа нить из фокальной плоскости на заметную величину, по оставляя ее на пути сходящихся или расходящихся лучей, мы обнаружим на освещенном волновом фронте тень от нити в виде изогнутой или прямой линии, в зависимости от наличия или отсутствия aberrаций у испытываемого волнового фронта; при узкой щели и тонкой нити эта полоска тени будет иметь дифракционную структуру, что позволит с большей точностью и чувствительностью осуществить наводку центра полоски тени на избранную зону теневой картины.

Так от моего первого метода мы переходим к моему второму методу щели и нити, поясненному на рис. 71. Здесь  $ABC$  — фронт волны, обладающий некоторыми aberrациями;  $O$  — фокус волны или, точнее, фокус параксиальной области волнового фронта;  $BO$  — оптическая ось;  $M$  — нить, сзади которой расположен глаз наблюдателя. Глаз увидит полоску тени, изображенную внизу рисунка; своим дифракционным максимумом (в случае тени, вернее сказать, — минимумом) тень проходит через зону  $y$  для горизонтального диаметра теневой картины; ошибки волнового фронта искривили некоторым образом полоску тени.

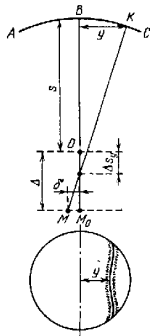


Рис. 71.

Если назвать:  $s$  — расстояние от вершины  $B$  до фокуса волнового фронта,  $\Delta$  — смещение (дефокусировку) нити с фокуса  $O$ ,  $\delta$  — смещение нити с оптической осью, — то продольная aberrация  $\Delta s_y$  для зоны  $y$  вычисляется по следующему выражению:

$$\Delta s_y \sim \frac{y\Delta - \delta(2s^2 - y^2)}{y + \delta} \approx \frac{y\Delta - \delta s}{y + \delta} \approx \Delta - \frac{\delta s}{y}, \quad (108)$$

где знаки приближенного равенства ( $\sim$ ,  $\approx$  и  $\approx$ ) говорят о постепенном падении точности результата в связи с приближенными допущениями: 1) что сферический фронт заменен параболическим; 2) что  $y$  весьма мало по сравнению с  $s$  и 3) что  $\delta$  весьма мало по сравнению с  $y$ .

Задача вычисления продольных aberrаций  $\Delta s_y$  сводится, таким образом, к установлению положения точки  $O$ , к измерению смещений  $\Delta$  и  $\delta$  и к определению величины  $y$ .

Для нахождения точки  $O$  возвращаемся к первому методу щели и нити и, перемещая нить вблизи точки  $O$ , добиваемся такого положения, при котором центральная область теневой картины представляется в виде темного пятна или площадки, лишенной теневого рельефа.

Далее, отодвигаем штифт в плоскость  $MM_0$ , измеряя дефокусировку  $\Delta$  на суппорте продольных перемещений теневого прибора, и устанавливаем штифт в положение  $M_0$ , при котором центр дифракционной картины полосы тени проходит через отметку  $B$  в центре волнового фронта. Смещение  $\delta = MM_0$  измеряется на суппорте поперечных перемещений теневого прибора. Наконец,  $y$  измеряется с помощью миллиметровой линейки, как проекция расстояния между метками  $B$  и  $K$  на волновом фронте. Конечно, на волновом фронте, в строгом смысле слова, нельзя сделать никаких меток, но мы относим волновой фронт к какому-нибудь реальным поверхностям оптической системы, на которых и делаем соответствующие отметки тем или иным способом, например, жирным карандашом на стекле.

Второй метод щели и штифта является своеобразным теневым усовершенствованием метода Гартмана, обладая по сравнению с этим последним более высокой чувствительностью и значительно большей простотой; кстати, метод Гартмана, хорошо известный оптикам и астрономам, мы не собираемся здесь описывать, считая его достаточно несовершенным и слишком громоздким методом исследования; кроме того, в качестве рабочего (а не контрольного) метода, метод Гартмана совершенно неприменим, как связанный с фотографическим процессом, т. е. с длительным экспонированием, проявлением, фиксированием и сушкой негативов и, наконец, с длительным и кропотливым измерением этих негативов на компараторе. Ни один уважающий себя и дорожащий временем оптик не согласился бы использовать метод Гартмана в качестве рабочего метода при изготовлении оптических поверхностей и систем, даже если бы метод Гартмана обладал вполне удовлетворительной чувствительностью и надежностью.

В описанном мною методе не вполне уверенно определяется положение в пространстве точки  $O$  — фокуса параксиальной области. Поэтому выгоднее отсчет  $\Delta$  вести не от параксиального фокуса, а от фокуса некоторой избранной зоны, достаточно удаленной от вершины  $B$ . В этом случае выражение (108) дает продольные aberrации, отсчитанные от некоторой плоскости, отличной от плоскости Гаусса, что, впрочем, не вызывает затруднений при вычислении волновых aberrаций исследуемого фронта волны.

Подробное описание теневой методики потребовало бы не отдельной главы настоящей книги, а большой специальной монографии, значительно превосходящей по объему то, что ранее было мною написано по этому вопросу\*). Поэтому здесь я не излагаю ни метода Рунки, родственного описанным методам щели и штифта, ни интерферометрического метода Цернике\*\*), по существу аналогичного методу В. И. Линника, а по внешним признакам, но не по существу, напоминающего описанный метод точки и

\*) Максудов Д. Д. Теневые методы исследования оптических систем. — Проблемы новейшей физики, 1934, вып. XXIII.

\*\*) См. в Списке дополнительной литературы № 38, 39, 47. (Прим. ред.)

точечного экрапа, ни метода Плацэка и Гавиолы, использующих мои методы щели и нити для исследования волнового фронта из точек его каустики.

По тем же причинам я не рассматриваю здесь предложенного мною «количественного теневого метода»<sup>\*)</sup>. Кроме того, последний, являясь хорошим контрольным методом, непригоден в качестве рабочего метода исследования, так как он связан с фотографированием и последующим фотометрированием негативов теневых картин.

Описанных методов точки и пока, щели и пока и щелп и нити совершенно достаточно, чтобы наладить и рабочее и контрольное испытание оптических поверхностей и систем; чувствительность же теневых методов, падающим образом примененных, пока с избытком удовлетворяет наиболее требовательного оптика<sup>\*\*)</sup>.

Применение теневого метода в оптической практике очень разнообразно, как это мы увидим дальше.

1. Теневой метод позволяет чувствительно определить положение центра сходящейся сферической волны, и потому он применим для точного измерения радиусов кривизны вогнутых сферических поверхностей и фокусных отрезков в объективах.

2. Теневой метод обнаруживает малейшие местные и зональные ошибки полного фронта, а потому он применим к исследованию формы вогнутых поверхностей и к исследованию неоднородностей и свилей стекла.

3. Теневая картина позволяет с высокой точностью установить положение точек пересечения нормалей к каждой зоне фронта волны, что даст возможность производить количественные исследования аберраций оптических деталей или целых систем.

4. Применяя фильтрованный или монохроматический свет, мы получаем возможность осуществлять качественные и количественные теневые исследования хроматических свойств объективов и других преломляющих систем.

<sup>\*)</sup> *Максугов Д. Д.* Новый количественный теневой метод.— *Журн. Опт.-мех. промышленности*, 1932, № 11.

*Максугов Д. Д.* Теневые методы исследования оптических систем.— *Проблемы новейшей физики*, 1934, вып. XXIII.

<sup>\*\*)</sup> По я не могу и не хочу умалчивать здесь о полном игнорировании за границей наших достижений в области усовершенствования теневой методики. Возьмем *Journal. Soc. of America* или, например, одну из книг, широко распространенных среди американских астрономов и оптиков: «*Amateur telescope making advanced*». Из них мы узнаем: а) что замена зональной диафрагмы Ричи разметкой зон на поверхности зеркала и освобождение при этом от дифракционных помех; б) что чувствительное определение астигматизма по вращению теневой картины; с) что замена точки щелью, а пока Фуко нитью или второй щелью,— что все эти полезные усовершенствования теневого метода либо остаются без указания их настоящего автора, либо приписываются авторам более поздним. Так, *R. Platzek* и *E. Gaviola* (*J. O. S. A* 1939, № 11) описывают, как естественно пришедший им в голову, метод щели и нити и негативный ему метод двух щелей через 17 лет после его появления в Советском Союзе и через 7 лет после его опубликования в цитированных выше трудах ГОИ.

5. Теневой метод, как мы увидим дальше, улавливает и измеряет ничтожно малый астигматизм пучка, а потому становится возможным высокочувствительное исследование плоскостей в схеме метода Коммона.

6. Наглядность и легкость интерпретации теневых рельефов делают теневой метод незаменимым при ретуши оптических надел и систем.

7. Замена глаза наблюдателя фотографической камерой превращает субъективный теневой метод в объективный (метод фо-кограмм, количественный теневой метод автора).

Методика изготовления и контроля астрономической оптики может быть построена от начала до конца на использовании теневого метода. Это положение оказалось вполне рациональным и отлично оправдало себя на многолетней нашей практике, а потому ничего лучшего мы пока не желаем и не ищем и строим весь дальнейший материал настоящей книги, базируясь почти исключительно на теневой методике контроля.

В заключение главы нам предстоит ознакомиться с устройством и принципиальной конструкцией так называемых теневых приборов, являющихся основной частью всякой установки для

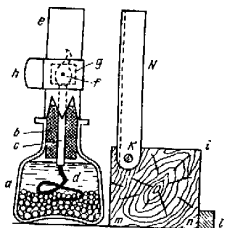


Рис. 72.

теневого исследования. Их достоинства и недостатки можно легко показать, если проследить постепенную эволюцию теневых приборов. Поэтому я опишу несколько теневых приборов, начав с того, с которым я приступал к работам по астрономической оптике на границе своего детства и юности и кончая одним из современных образцов.

В 1911 г. при изготовлении своих первых параболических зеркал я пользовался теневым прибором, изображенным на рис. 72.

В стеклянную банку *a*, загруженную для устойчивости дробью, наливался керосин; через пробку *b* и металлическую трубку с проходившим фитилем *d*; на такую «коптилку» вместо стекла надевался металлический цилиндр *e* в виде латунной трубки с вырезанным внизу фестоном для создания тяги; в латунном цилиндре на уровне пламени *f* было вырезано квадратное окно *g*; вдоль же цилиндра *e* могла передвигаться цилиндрическая тошкостенная пружинящая заслонка *h* с одним или несколькими точечными отверстиями, проколотыми иглой.

Устанавливая отверстие желательного диаметра против наиболее яркого места пламени *f*, я осуществлял светящуюся точку, засвечивающую более или менее равномерно достаточный для моих целей апертурный угол и имеющую поверхностную яркость около 1,5 стильба (керосиновое пламя). Нож Фуко был изготов-

лен из ножовочного полотна  $N$  с заточенным лезвием; к массивной, хорошо острогаемой колодке  $i$  нож привинчивался шурупом  $k$  и мог от руки покачиваться для перекрывания точечного изображения. Светильник, вместе со светящейся точкой, оставался неподвижным во время наблюдений, тогда как колодка  $i$  с ножом  $N$  перемещалась от руки в продольном направлении, оставаясь все время плотно прижатой к направляющей планке  $l$ .

Осуществив фокусировку ножа на избранную зону, я прочерчивал остро заточенным карандашом линию вдоль ребра  $mn$  бруска  $i$ , для чего на столе под таким теплым прибором была припижена ватманская бумага; измерение продольных aberrаций сводилось к измерению расстояний между карандашными штрихами на ватманской бумаге. Подобными примитивными тепевыми приборами пользовались многие английские оптики-любители; эти приборы описаны А. А. Чикиным\*), а все мое «творчество» состояло лишь в том, что я насыпал в копилку дробь для придания ей устойчивости и приспособил ножовочное полотно в качестве ножа, используя в нем уже готовое отверстие для шурупа  $k$ . Основными недостатками такого прибора являются: 1) малая поверхностная яркость источника света; 2) значительное расстояние между светящейся точкой и лезвием ножа; 3) слишком грубые перемещения ножа и примитивность измерения этих перемещений. Все же, в 1911—1912 гг. мне удалось изготовить в числе нескольких зеркал одно вполне удовлетворительное параболическое зеркало  $D=215$  мм и построить соответственный самодельный телескоп.

В 1921 г. начался второй этап моих работ по астрономической оптике. В это время я располагал суппортом токарного станка, а потому мог укрепить тепевой прибор на суппорте, осуществлять точные перемещения светящейся точки и ножа, связанных в одно целое, измерять эти перемещения с точностью до 0,02—0,03 мм. Кроме того, имея в виду исследование достаточно светосильных зеркал, я значительно сблизил светящуюся точку и нож и наблюдал, таким образом, тепевые картины не на побочных осях, а вблизи оптической оси зеркала, т. е. уменьшал померхи из-за комы и астигматизма. Этот новый тепевой прибор схематически изображен на рис. 73. На суппорте  $a$  укреплен коросиновый светильник в виде латунной трубки  $b$  с боковым открытым коленом  $c$  для подливания керосина; фитиль  $d$  пропущен через тонкую трубку  $e$ ; пламя  $f$  находится против пружинящего кольца  $g$ , несущего на себе точечное отверстие  $h$  и лезвие ножа  $N$ , как это показано в нижней части рисунка (план). Пружинящее кольцо  $g$  надето на трубку  $i$ , заменяющую ламповое стекло и имею-

\*) Чикин А. А. Отражательные телескопы (изготовление рефлекторов доступными для любителей средствами). — Пг., 1915, 128 с.

А. А. Чикин (1865—1924) — советский оптик, учитель Д. Д. Максудова, с 1919 г. работал в Гос. оптическом институте. А. А. Чикин известен разработкой и популяризацией изготовления зеркал и объективов для телескопов. (Ирм. ред.)

цию в нижней части ряд отверстий для создания воздушной тяги. Светильник в таком виде дает спокойное некоптящее пламя; малый диаметр трубки  $i$  (~15 мм) позволяет достаточно сблизить лезвие ножа и светящуюся точку, а припаятая конструкция позволяет расположить их приблизительно в одной плоскости, перпендикулярной оптической оси.

Но мне не удалось повысить поверхностной яркости источника света, так как я жил в то время за городом под Одессой, где не

было электрического освещения и где приходилось пользоваться только керосиновым светильником. Если бы обстановка моих экспериментов была в этом смысле более культурной, я, может быть, не скоро додумался бы до замены точки щелью. Но явный недостаток света при малых размерах отверстий побуждал меня к поискам путей для повышения яркости теневой картины, и в результате я заменил на своем приборе точечное отверстие щелевидным; это было сделано летом 1921 г.

Третий период моих работ по астрономической оптике начинается с 1930 г., когда я приступил к организации лаборатории астрономической оптики в Государственном оптическом институте (ГОИ).

Здесь разрабатывалась и постепенно совершенствовалась методика теневых

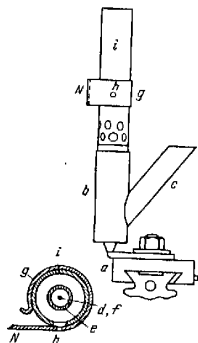


Рис. 73.

исследований и было построено несколько теневых приборов различной конструкции, из которых я опишу один из более поздних, хотя и не самый последний. На рис. 74 изображен прибор, являющийся узлом теневой установки, успешно работающей в лаборатории более 10 лет. Принципиальная схема дана на рис. 75.

Источником света является автомобильная лампа 1, имеющая юстировочное устройство для приведения спирального волоска лампы в желательное положение. Волосок лампы устанавливается в фокусе объектива 2, имеющего фокусирующее приспособление. Объектив 3 вместе с плоским металлическим зеркалом 4 строит изображение волоска лампы 1 в точке S; зеркало 4 выполнено из нержавеющей стали, а затем покрыто слоем алюминия, испаренного в вакууме. В зеркальной металлической площадке 5 имеется прямоугольное точно обработанное окно, расположенное против точки S. Площадка 5 на левом ребре образует лезвие ножа Фуко N, параллельное с высокой точностью левой границе прямоугольного окна. Вращающийся диск 6 имеет два поперечных среза и несколько точечных отверстий различного диаметра; на рисунке (внизу) диск 6 установлен так, чтобы образовалась

светящаяся щель  $S$ , причем эта щель с высокой точностью параллельна лезвию ножа и лежит с ним в одной зеркальной плоскости

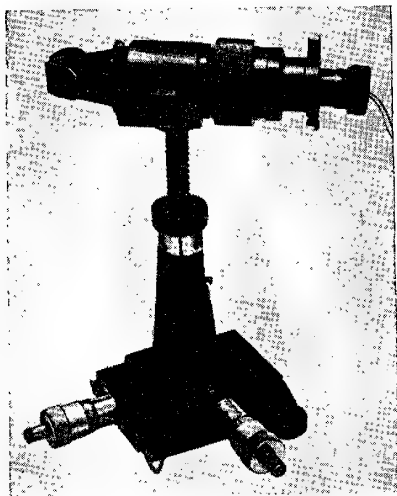


Рис. 74.

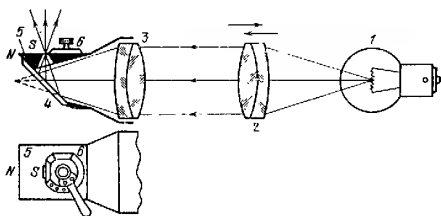


Рис. 75.

5, в случае необходимости устанавливаемой (по автоколлимации) перпендикулярно оптической оси исследуемого изделия.



Из щелей или точек  $S$  (различного размера) выходит пучок лучей, равномерно засвечивающий апертурный угол  $\sim 1:2,5-1:3$ . В случае, например, исследования вогнутых зеркал или линзовых объективов в автоколлимационной установке, возвращающийся к прибору пучок строит изображение  $S$  в  $N$ ; перемещение прибора вверх — вниз, вперед — назад и влево — вправо позволяет совместить это изображение с лезвием ножа, а затем перекрывать его ножом до достижения наиболее чувствительной теневой картины.

Продольные и поперечные перемещения суппорта прибора измеряются с точностью 0,01 мм как на барабанах винтов, так и на специальных точных шкалах. Сзади ножа и изображения окна  $S$  располагается либо глаз, наблюдающий теневую картину, либо сильный окуляр, позволяющий наблюдать качество точечного изображения.

Так работает теневой прибор, используя белый свет для исследования зеркальных систем. Но для исследования линзовых систем, обладающих хроматизмом, и для исследования самого хроматизма таких систем, желательно применение монохроматического света. В этом случае, путем смены источника света и включения монохроматора, прибор преобразовывается в новую

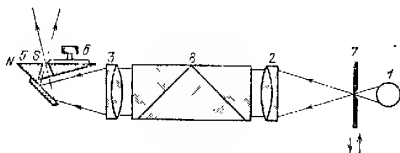


Рис. 76.

схему, показанную на рис. 76. Здесь источником света 1 является ртутная или ртутно-кадмиевая дуга, засвечивающая подвижную (первую) щель 7 монохроматора. Объективы 2 и 3 прежние, а между ними включена специальная призма прямого зрения 8\*), допускающая использование не только в параллельных, но и в сходящихся и в расходящихся лучках; в случае возможности точной фокусировки щели 7 и точки  $S$  относительно объективов 2 и 3 вместо моей призмы 8 можно пользоваться обычной призмой Амичи. Перемещая щель 7 перпендикулярно оптической оси прибора, можно «посадить» ту или иную спектральную линию источника 1 на вторую щель  $S$  и осуществить засветку монохроматическим светом.

Ртутно-кадмиевая дуга 1 при достаточной интенсивности представляет собой наиболее выгодный источник света, так как по-

\*) Максугов Д. Д. Призма прямого зрения. — Авторское свидетельство № 49363 по заявке от 2 февраля 1936 г.

звояет использовать большой набор монохроматических палу-  
чений от красного до фиолетового. В табл. 19 приведены значе-  
ния длин волн для достаточно ярких линий ртутно-кадмиевого  
спектра.

В описываемом приборе призма 8 заключена во вращающемся  
барабане, имеющем 2 отверстия; одно для призмы п другое для  
прохождения белого пучка. В другой модели теневого прибора

Т а б л и ц а 19

| $\lambda$ , мм | 0,6438  | 0,5769<br>0,5790<br>(дублет) | 0,5461<br>(e) | 0,5086               | 0,4799       | 0,4678       | 0,4359<br>(g) | 0,4047<br>(h)   |
|----------------|---------|------------------------------|---------------|----------------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|
| Цвет           | красный | желтый                       | зеле-<br>ный  | (зелено-<br>голубой) | голу-<br>бой | голу-<br>бой | синий         | фиолето-<br>вый |
| Элемент        | кадмий  | ртуть                        | ртуть         | кадмий               | кад-<br>мий  | кад-<br>мий  | ртуть         | ртуть           |

барабан имеет 6 отверстий: 1) для прохождения белого пучка;  
2) для призмы монохроматора; 3) для молочного стекла, обеспе-  
чивающего особенно равномерную засветку за счет потери в яр-  
кости: 4) красного фильтра; 5) зеленого фильтра и 6) синего  
фильтра. Таким образом эта модель позволяет кроме того поль-  
зоваться фильтрованным светом, что для многих исследований  
вполне достаточно.

Часто приходится исследовать весьма светосильные системы  
или вогнутые поверхности с весьма большим апертурным углом.  
Для таких исследований апертурный угол 1:2,5 оказывается не-  
достаточным, а потому к теневому прибору приложен дополни-  
тельный узел, так называемый *осветитель*  
*высокой апертуры*, сущность которого пояс-  
нена на рис. 77.

Перед световым окном  $S$  теневого прибо-  
ра расположено маленькое вогнутое зер-  
кало  $M$ ; оно строит изображение окна  $S$   
(крупной светящейся точки) на шарике  $N$ ,  
после чего в шарике  $N$  появляется умень-  
шенное изображение зеркальца  $M$ ; умень-  
шенное изображения зеркальца  $M$  в шарике  
 $N$  приблизительно равно отношению полови-  
ны радиуса шарика  $N$  (т. е.  $\frac{1}{4}$  его диаметра)  
к расстоянию между  $M$  и  $N$ . Шарик  $N$  вы-  
полнен в виде плоско-выпуклой линзы с вы-  
сотой, равной  $\frac{1}{4}$  диаметра шарика. Материалом для такой лин-  
зы служит стальной шарик от шарикоподшипника  $\varnothing \sim 3-4$  мм,  
оптически отполированный с одной стороны, а с другой стороны  
сшлифованный на плоскость до получения пужной высоты  
линзы с острым краем. Этот острый край стальной линзочки

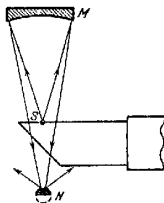


Рис. 77.

служит в качестве кругового пожа Фуко, лежащего в одной плоскости с мнимой светящейся точкой. Как зеркальце  $M$ , так и стальная линза  $N$ , алюминированы. Зеркальце  $M$  можно закрывать диафрагмами различного размера, в том числе и щелевидными диафрагмами. Шарик  $N$  обеспечивает засветку полупространства, а его аберрации (в случае сферической формы поверхности) не так уже велики, благодаря малым размерам шарика. Узел из зеркальца  $M$ , шарика  $N$  и соответствующих юстировочных приспособлений укрепляется на головке теневого прибора, подобно описанному ранее откидному окуляру.

Наконец, имеется возможность устанавливать вблизи лезвия пожа параллельную ему нить или щель для применения метода щели и нити и метода двух щелей. Кроме того, лезвие пожа может иметь дополнительный срез под углом  $45^\circ$  для исследования и измерения астигматизма с помощью теневого метода.

В описанном приборе (рис. 75) точки  $S$  и  $N$  отделены расстоянием 8 мм, а это значит, что при исследованиях мы смещаемся с оптической оси на 4 мм; в более поздних приборах такое смещение доведено до десятых долей миллиметра.

Как видим, современный теневой прибор представляет собой довольно сложную и деликатную конструкцию, рассмотренную нами лишь в общих чертах. В то же время такой прибор позволяет производить самые разнообразные качественные и количественные исследования с весьма высокой чувствительностью \*).

\*) Важно подчеркнуть, что чем меньше расстояние между светящейся точкой и лезвием пожа Фуко, тем меньше оказываются внесистемные аберрации исследуемой оптической системы. При использовании некоторых схем исследования теневого прибор может оказаться помещенным в ходе лучей. При этом тепло, выделяемое падающим в приборе источником света, приводит к появлению турбулентции, а сам прибор заслоняет часть испытываемой поверхности. Кроме того, и наблюдению глазом иногда мешает прикосновение к сильно нагретому корпусу теневого прибора. Использование в настоящее время волоконной оптики можно уменьшить расстояние между светящейся точкой и ножом и вывести источник света за пределы хода лучей. Фильбер (Philbert M.— *Optica Acta*, 1967, 14, № 2, p. 169), используя телевизионную технику и интегрирование электрического сигнала, получил возможность непосредственно выдавать на экран телевизора профиль исследуемой поверхности. (Прим. ред.)

## ИЗМЕРЕНИЕ КРИВИЗНЫ ИНСТРУМЕНТА И ИЗДЕЛИЙ

Радиус кривизны сферической поверхности принято измерять прибором, называемым *сферометром*. В зависимости от требований точности и размеров исследуемых изделий сферометры могут быть самых разнообразных конструкций, начиная от простейшего и всем известного очкового сферометра и кончая сложными и точными современными оптическими сферометрами\*). Большинство сферометров измеряет стрелку ( $x$ ) шарового сегмента с основанием заданного радиуса ( $H$ ); зная стрелку и основание сегмента, можно вычислить радиус кривизны ( $R$ ) сферической поверхности. На рис. 78 изображена сфера радиуса кривизны  $R$  с центром в точке  $O$ . Если известны  $H$  — радиус основания сегмента и  $x$  — стрелка сегмента, то:

$$R = \frac{H^2 + x^2}{2x}. \quad (109)$$

Выпишем также полезные для нас в будущем зависимости, непосредственно вытекающие из выражения (109):

$$H = \sqrt{2Rx - x^2}, \quad (110)$$

$$x = R - \sqrt{R^2 - H^2}. \quad (111)$$

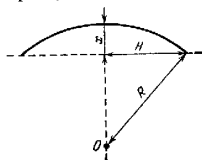


Рис. 78.

Заметим, что для параболической поверхности  $R_0$  — радиус кривизны при вершине параболоида определяется более простым выражением:

$$R_0 = \frac{H^2}{2x}, \quad (112)$$

откуда:

$$H = \sqrt{2R_0x}, \quad (113)$$

$$x = \frac{H^2}{2R_0}. \quad (114)$$

В случае относительно малой кривизны сферической поверхности, когда такая поверхность мало отличается от параболической, возможно применение формул (112), (113), (114), вместо

\*) Р. Е. Гершберг и В. И. Проник разработали теорию исследований любых асферических поверхностей с помощью сферометра. См. Изв. КРАО, 1981, т. 63, с. 474. (Прим. ред.)

(109), (110), (111); эти формулы, являясь точными для параболоида, окажутся приближенными для сферы, у которой  $R = R_0$  (при  $R \gg H$ ).

Сферометр, который можно было бы рекомендовать для измерения кривизны крупных оптических поверхностей, изображен схематически на рис. 79.

На изделие  $A$  с вогнутой или выпуклой сферической поверхностью накладывается сферометр, опалчивающийся зонтообразным телом  $1$  с точно обработанной острой кольцевой кромкой радиуса  $H$ ; в дальнейшем эта кромка спилена, сошлифована или протравлена кислотой за исключением трех равноотстоящих участков  $a$ , определяющих положение сферометра на испытываемой поверхности изделия  $A$ . По будем здесь мотивировать, почему лучше оставить три участка  $a$ , а не всю кольцевую кромку.

В центральном, тщательно отшлифованном, канале сферометра свободно скользит точный цилиндрический стержень  $2$ , который под действием силы тяжести опускается своим

нижним шариком до соприкосновения с испытываемой поверхностью. Чтобы смягчить возможные удары шарика об оптическую поверхность и уменьшить деформации шарика, стержень  $2$  разгружен через блок  $3$  с помощью противовеса  $4$ , поглощающего значительную долю веса стержня  $2$ . На стержне  $2$ , ограниченном от вращения шпонкой, сделан плоский срез и на нем укреплен точная шкала  $5$ . Отсчет производится с помощью микроскопа  $6$ , с объективом  $7$ , окуляром  $8$  и окулярным микрометром  $9$ . Точность отсчета  $\sim 1$  мкм.

Сперва устанавливают сферометр на точную оптическую плоскость и находят с помощью отсчетного микроскопа некоторый «нулевой отсчет»  $N_0$ ; затем устанавливают сферометр на испытываемую поверхность и находят некоторый отсчет  $N$ . Очевидно, что измеряемая стрелка  $x$  равна разности этих отсчетов:

$$x = N - N_0. \quad (115)$$

Так как каждый из отсчетов выполнен с точностью  $\sim \pm 1$  мкм, то величина стрелки нам известна с точностью:

$$\Delta x \sim \pm 2 \text{ мкм}. \quad (116)$$

Чтобы ошибка в определении радиуса кривизны поверхности была по возможности малой, следует использовать возможно большие стрелки  $x$ ; но стрелка  $x$  растет (114) пропорционально

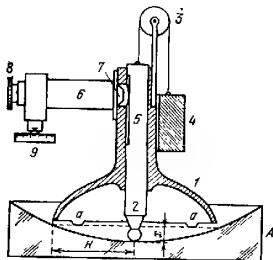


Рис. 79.

$\sim H^2$  при данном радиусе  $R$ , а потому, чем больше диаметр  $2H$  кольца сферометра, тем это выгоднее. Понятно, что  $2H$  не может превышать диаметра испытываемой поверхности, но ясно, что для крупных поверхностей выгоднее применять и сферометры крупных размеров.

Однако особенно крупные сферометры лишены интереса, так как они очень тяжелы, легко деформируются под действием собственного веса, их точная обработка затруднена и, кроме того, может быть нарушена в результате последующих деформаций, часто имеющих место при больших массах металла.

По-видимому, даже для очень крупной оптики диаметр кольца сферометра не следует брать больше  $2H = 200$  мм.

На таком сферометре мы и остановимся и используем его для измерения радиусов кривизны у поверхностей с диаметром от 200 мм и выше.

Пользуясь выражениями (109), (111) и (116), составим таблицу для погрешности  $\Delta R : R$ , выраженной в процентах, для пяти различных диаметров ( $D$ ) поверхностей и для пяти различных значений  $D : R$ , помня, что  $\Delta R : R \approx \Delta x : x$  (табл. 20).

Таблица 20

| $D \backslash D:R$ | 1:2,5  | 1:5   | 1:10 | 1:20 | 1:40 |
|--------------------|--------|-------|------|------|------|
| 250                | 0,025% | 0,05% | 0,1% | 0,2% | 0,4% |
| 350                | 0,035  | 0,07  | 0,14 | 0,28 | 0,56 |
| 500                | 0,05   | 0,1   | 0,2  | 0,4  | 0,8  |
| 700                | 0,07   | 0,14  | 0,28 | 0,56 | 1,1  |
| 1000               | 0,1    | 0,2   | 0,4  | 0,8  | 1,6  |

Как видим, даже для первого, наиболее выгодного случая, радиус кривизны может быть измерен с относительной погрешностью, превышающей 0,02%; для более же крупных поверхностей с малым отношением  $D : R$  эта погрешность может превышать 1%, что совершенно недостаточно для большинства практических целей.

Можно сформулировать результат еще в следующем образом: погрешность измерения стрелки поверхности в лучшем случае, т. е. при диаметре кольца сферометра, равном диаметру исследуемой поверхности, равна 2 мкм, что в  $\sim 30$  раз больше допуска на местные ошибки для первоклассных зеркал; в одних случаях такая ошибка не страшна, а в других она недопустима.

Заметим, что мы учитывали только одну единственную погрешность  $\Delta x$  в измерении стрелки  $x$ . В действительности величина  $H$ , входящая в выражение (109), известна нам с некоторой погрешностью  $\Delta H$ , часто весьма значительной. Поэтому цифры табл. 20 можно назвать оптимистическими и преуменьшенными.

Рассмотрим (рис. 80) другой вид сферометра, придуманного мной для случаев измерения кривизны крупной астрономической

оптики\*). Пусть вогнутое зеркало  $A$  имеет действующее отверстие  $D$ . Накладываем на зеркало линейку  $B$  с точной плоской нижней поверхностью и подкатываем под эту поверхность шарик  $C$  от шарикоподшипника, пока он не заклинится между линейкой и испытываемой поверхностью; для этого, очевидно, диаметр  $d$  шарика  $C$  должен быть меньше

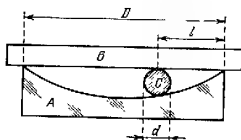


Рис. 80.

стрелки зеркала. Измерив расстояние  $l$  от края зеркала до точки касания линейки и шарика, находим значение радиуса кривизны  $R$  зеркала  $A$  по следующей совершенно точной формуле:

$$R = \frac{l(D-l)}{2d} + \frac{d^2}{8l(D-l)}. \quad (117)$$

При длинных радиусах  $R$  вторым членом можно пренебречь, так как он изменяет величину радиуса приблизительно на половину диаметра шарика; шарик же в этих случаях имеет малый диаметр. Поэтому точная формула (117) может иногда применяться в приближенном виде:

$$R \approx \frac{l(D-l)}{2d}. \quad (118)$$

Погрешность  $\Delta R$  в определении радиуса  $R$  легко выводится из выражения (118) в виде\*\*)

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta D}{D-l} + \frac{\Delta l(D-l)}{l(D-l)}. \quad (119)$$

Из полученной формулы, между прочим, видно, что величину  $l$  можно измерить с малой точностью, когда  $2l$  приближается к  $D$ , т. е. когда диаметр шарика достаточно близок к величине стрелки зеркала, а потому заклинивается близко от вершины зеркала. Произведем исследование погрешности  $\frac{\Delta R}{R}$ . Диаметр ( $d$ ) шарика может быть измерен с точностью до 1 мкм и с такой же точностью будет сохраняться постоянство диаметра хорошего шарика по различным направлениям. Поперечник ( $D$ ) зеркала может быть без труда измерен линейкой с точностью до 0,5 мм ( $\Delta D = 0,5$  мм), для чего полезно снабдить линейку  $B$  шкалой. Отрезок  $l$  без особых ухищрений может быть измерен с такой же точностью ( $\Delta l = 0,5$  мм). Изготовить стеклянную линейку  $B$  с ошибкой до 1 мкм при длине 1 м, как мы увидим дальше, не представляет особых трудностей. Так как эта ошибка может сложиться с ошибкой измерения диаметра шарика и так как диаметры одного и того же шарика по различным направлениям

\*) Максудов Д. Д. Авторское свидетельство № 34190 по заявке № 119766 от 7 декабря 1932 г.

\*\*) При выводе этой формулы, а также формулы (217), Д. Д. Максудов принимает, что погрешности всегда складываются. (Прим. ред.)

могут различаться на 1 мкм, то для погрешности  $\Delta d$  можно установить величину  $\Delta d = 3$  мкм.

Применим такой сферометр к измерению кривизны вогнутого сферического зеркала, имеющего, например,  $D = 1000$  мм и  $D : R = 1 : 40$  (последний случай табл. 20).

У такого зеркала стрелка кривизны  $x = 3,125$  мм; поэтому, выбрав шарик с диаметром  $d = 3$  мм, мы будем иметь  $l \approx 400$  мм. Подставив данные и найденные величины в выражение (119), находим:

$$\frac{\Delta p}{p} \approx 0,1\% + 0,08\% + 0,04\% \approx 0,22\%.$$

Последняя величина в 7,3 раза меньше соответственной величины табл. 20, а потому применение такого сферометра имеет смысл, во всяком случае при исследовании крупных зеркал малой кривизны. Так как величины  $D$  и  $l$  можно измерять и с большей точностью, а точные шарик и оптически исследованная линейка позволяют уменьшить погрешность  $\Delta d$  по сравнению с принятой нами, то в действительности описанный сферометр позволяет осуществить измерение кривизны с точностью около 0,1% в рассмотренном случае.

Применим тот же сферометр к зеркалу  $D = 250$  мм;  $D : R = 1 : 2,5$  (первый случай табл. 20). У такого зеркала стрелка кривизны  $x = 12,6$  мм. Возьмем шарик с диаметром  $d = 12$  мм, при этом окажется, что  $l \approx 100$  мм. Поэтому, на основании (119) и при  $\Delta d = 3$  мкм,  $\Delta D = 0,5$  мм;  $\Delta l = 0,5$  мм, получим

$$\frac{\Delta p}{R} = 0,025\% + 0,333\% + 0,167\% = 0,525\%.$$

Последняя величина в 21 раз больше соответственной величины табл. 20, а потому применение нашего сферометра лишено смысла при исследовании малых зеркал большой кривизны. О специальном устройстве, повышающем точность измерения величины  $D$  и  $l$ , здесь говорить не будем, хотя такая возможность имеется.

В случае выпуклых поверхностей мой сферометр предусматривает два шарика, зажимаемых под плоскую линейку ( $B$ ), как это показано на рис. 81. Пусть диаметры шариков  $d_1$  и  $d_2$  не равны друг другу и пусть расстояние между точками касания шариков и линейки равно  $L$ .

В этом случае радиус кривизны  $R$  дуги  $A$  определяется по формуле:

$$R = \frac{l^2}{2(d_1 + d_2 + 2\sqrt{d_1 d_2})}. \quad (120)$$

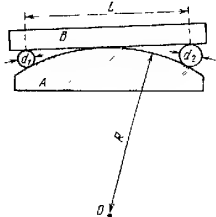


Рис. 81.



При равенстве диаметров двух шариков ( $d_1 = d_2 = d$ ) формула (120) принимает более простой вид:

$$R = \frac{L^2}{8d}. \quad (121)$$

В последнем случае погрешность в определении  $R$ :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{2\Delta L}{L}. \quad (122)$$

В соответствии с прежними предположениями примем  $\Delta L = 0,5$  мм, и в то же время для  $\Delta d$  приходится принять  $\Delta d = 5$  мкм (вместо 3 мкм), так как погрешность измерения диаметров шариков входит дважды.

При выпуклом зеркале  $D = 1000$  мм,  $D : R = 1 : 40$ ,  $x = 3,125$  мм можно взять два шарика с диаметрами  $d = 3$  мм и заклинить их под концы метровой линейки, причем окажется (121), что  $L \approx 980$  мм. Поэтому погрешность:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 0,17\% + 0,1\% \approx 0,27\%,$$

т. е. близка к погрешности измерения кривизны такого же вогнутого зеркала.

При исследовании кривизны «пробных» стекол, обычно изготавливаемых парами (выпуклое + вогнутое одинакового радиуса), удается почти вдвое повысить точность измерения радиуса кривизны при пользовании сферометром любого типа. Действительно, пара пробных стекол обычно имеет кривизны, совпадающие с оптической точностью; это значит, что при наложении одного стекла на другое, зазор между ними в виде воздушной линзы не превышает 1 полосы интерференции, т. е.  $\sim \frac{1}{4}$  мкм. Измерив радиус кривизны выпуклого стекла с погрешностью  $\Delta R_1$ , а затем независимо радиус кривизны вогнутого стекла с погрешностью  $\Delta R_2$ , мы берем полусумму найденных значений  $R_1$  и  $R_2$  в качестве радиуса кривизны и считаем, что имеющаяся в этом случае погрешность  $\Delta R$  будет меньше отдельных погрешностей  $\Delta R_1$  или  $\Delta R_2$ , так как произведено два независимых измерения практически одного и того же радиуса кривизны.

Теневой метод позволяет в корпе изменить и улучшить методику измерения кривизны и отказаться от услуг сферометра, по крайней мере, в большинстве случаев интересных для астрономической оптики. Начнем с измерения кривизны вогнутых сферических поверхностей (рис. 82).

Вогнутая сферическая поверхность  $ABC$  имеет своим центром кривизны точку  $O$ ;  $R = BO$  — радиус кривизны этой поверхности.

Пусть  $S$  — светящаяся точка (или щель) теневого прибора, тогда  $S'$  — ее изображение, совмещаемое с лезвием ножа. Точка  $S$  и лезвие ножа  $S'$  лежат в некоторой плоскости  $PSNS'P'$ , ко-

торую удается расположить перпендикулярно оси  $BO$ . Но если бы эта плоскость и не была строго перпендикулярна оси  $BO$ , положение точки  $N$  практически не изменилось бы, так как незначительному смещению точки  $S$  вправо (например) соответствовало бы такое же смещение точки  $S'$  влево, и плоскость  $PSNS'P'$  повернулась бы на побольший угол вокруг точки  $N$ .

Точка  $N$  не совпадает с центром кривизны  $O$ , но отстоит от него влево на величину  $\Delta$ , зависящую от расстояния  $\delta$  между точкой  $S$  и ножом  $S'$  и от радиуса кривизны  $R$  вогнутой поверхности. Действительно, при лезвии ножа, перпендикулярном плоскости (рис. 82), необходимо установить нож на фокус меридионального отраженного пучка, для чего точку  $S$  необходимо расположить на  $MSOS'M'$  — поверхности вращения вокруг оси  $BO$ ; на этой же поверхности должна оказаться и точка  $S'$ . Нетрудно вычислить, что:

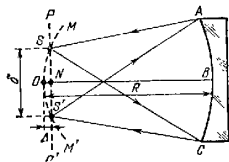


Рис. 82.

$$\Delta = NO = \frac{\delta^2}{4R}, \quad (123)$$

где  $\delta$  — расстояние между светящейся точкой  $S$  и лезвием ножа, перекрывающим ее изображение  $S'$ .

Таким образом, измерение радиуса кривизны сводится к фокусировке теплового прибора в положение, при котором исчезает рельеф у теневой картины, к измерению расстояния  $BN$  и к прибавлению к нему поправки  $\Delta$  (123):

$$R = BN + \Delta. \quad (124)$$

Расстояние  $BN$  на моей теневой установке измеряется с помощью концевых калибров и микрометричного перемещения теплового прибора, а потому выполняется с очень высокой точностью.

Чувствительность фокусировки ножа, мы помним, весьма велика. Поправка  $\Delta$  определяется также весьма точно, так как  $\delta$  мало по сравнению с измеряемым радиусом.

Здесь мы не будем рассматривать методику измерения радиусов на нашей теневой установке, но опишем простейший, хотя и менее точный, способ измерения с помощью хорошей стальной рулетки, для чего обратимся к рис. 83, повторяющему в значительной части рис. 82.

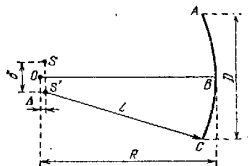


Рис. 83.

Рулетка позволяет достаточно точно измерить расстояние  $L$  от крайней точки  $C$  испытуемой поверхности до лезвия  $S'$  правильно отфокусированного пожа. Отрезок  $L$ , конечно, не равен радиусу  $R$  поверхности  $ABC$ , но нетрудно найти между ними следующую приближенную связь, если известен диаметр поверхности  $D$  (причем  $D < R$ ) и расстояние  $\delta$  между точкой и пожом и если принять, что  $L$  мало отличается от  $R$ :

$$R \approx \sqrt{L^2 - \frac{(D-\delta)^2}{4}} + \frac{D^2 + 2\delta^2}{8L} + \frac{D^4}{128L^3} \approx L + \frac{\delta(2D+\delta)}{8L} + \frac{D^4}{128L^3}. \quad (125)$$

Так, например, при  $D = 100$  мм и  $\delta = 8$  мм мы нашли  $L = 1000$  мм; спрашивается, чему равен радиус кривизны  $R$ ? Подстановка в (125) дает нам:

$$R = 1000 + 0,2080 + 0,0008 = 1000,209.$$

Мы видим, что последним членом выражения (125) можно вполне пренебречь даже в случае более короткофокусных зеркал; во втором члене, благодаря малости  $\delta$  по сравнению с  $D$ , можно также освободиться от  $\delta$  в скобках числителя, после чего выражение (125) в последнем приближении примет вид:

$$R \approx L + \frac{D\delta}{4L}. \quad (126)$$

Поятно, что при  $\delta = 0$  радиус  $R = L$ , так как в этом случае  $S$  и  $S'$  совмещены с точкой  $O$  и  $L = CO = R$ .

Чем меньше  $\delta$ , тем меньше нужно вводить поправки и тем проще и увереннее становится измерение радиуса кривизны. Вот, отчасти, почему мы стремились в новых теневых приборах по возможности сблизить точку и пож.

Посмотрим, с какой точностью удастся отфокусировать пож на фокус  $S'$  и с какой точностью можно измерить отрезок  $L$  с помощью хорошей рулетки.

Мы уже рассмотрели вопрос о предельной чувствительности теневого метода и знаем, что в лучшем случае можно ожидать от теневого метода чувствительность, близкую к  $\Delta h_{\min} \sim \sim \frac{1}{200}$  мкм. Это значит, что при переходе от истинного фронта сферической волны к сфере сравнения, отступающей на своей внешней зоне от фронта волны на  $\sim \frac{1}{200}$  мкм, мы обнаруживаем вместо плоского теневого рельефа движение тени либо слева направо, либо справа налево.

Такому переходу соответствует некоторая дефокусировка пожа  $\Delta R$ , которая определяется в виде

$$\Delta R \approx \pm \frac{8R^2}{D^2} \Delta h_{\min} \approx \pm 0,04 \frac{R^2}{D^2} \text{ мкм}, \quad (127)$$

где  $D$  — диаметр испытуемой вогнутой поверхности радиуса кривизны  $R$ .

Но мы будем более скромны и примем, что в обычных условиях работы, при теневом приборе среднего качества и при наблюдателе средней квалификации чувствительность теневого метода в 5 раз меньше указанной выше предельной чувствительности. Многочисленные экспериментальные проверки показывают, что мы действительно достаточно скромны при таком предположении, так как чувствительность теневого метода в этих случаях не в 5 раз ниже указанной предельной, а всего лишь в 1,4—3,5 раза, в зависимости от  $D:R$  и от ширины щели теневого прибора. Итак, установим, что  $\Delta' h_{\min} \approx \frac{1}{40}$  мкм, после чего выражение (127) примет вид

$$\Delta' R_{\min} \approx 0,2 \frac{R^2}{D^2} \text{ мкм.} \quad (128)$$

Составляем табл. 21 пределов дефокусировок  $\Delta' R_{\min}$  (в мм), при которых исследователь с несомненностью обнаруживает, что позж теневого прибора не совпадает с точкой  $S'$  — изображением точки (или щели).

Таким образом, при измерении радиуса кривизны теньевым методом мы прежде всего допускаем погрешность  $\Delta' R_{\min}$  (табл. 21), связанную с чувствительностью теневого метода. Как мы видим, эта погрешность очень мала: отнесенная к стрелке

Т а б л и ц а 21

| $D : R$            | 1 : 1  | 1 : 2,5 | 1 : 5 | 1 : 10 | 1 : 20 | 1 : 40 | 1 : 100 |
|--------------------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|---------|
| $\Delta' R_{\min}$ | 0,0002 | 0,0013  | 0,005 | 0,02   | 0,08   | 0,32   | 2,0     |

поверхности, она составляет  $\frac{1}{40}$  мкм, т. е. в 80 раз меньше таковой же погрешности сферометра (116), и в этом — первое и основное преимущество теневого метода перед методом сферометра.

Теневым методом использует полный диаметр испытуемой поверхности, тогда как сферометр ограничивает поверхность размерами своего кольца, а потому лишь в редких случаях стрелка поверхности измеряется с точностью 2 мкм; в большинстве же случаев измерений на сферометре погрешность в определении стрелки поверхности значительно превышает 2 мкм, и в этом — второе преимущество теневого метода.

Теневым методом измеряет радиус кривизны непосредственно, тогда как сферометр — косвенным образом; в случае измерений на сферометре входит погрешность  $\Delta H$  в определении радиуса  $H$  кольца сферометра, от чего свободен теневой метод, и в этом — его третье преимущество.

Опуская ряд второстепенных преимуществ теневого метода измерения кривизны, остановимся на его недостатках.

Первый недостаток описанного нами простейшего метода измерения кривизны состоит в сравнительно грубом измерении отрезка  $L$  с помощью рулетки. Если учесть, что с рулетки снимается два отсчета и что при каждом отсчете мы делаем ошибку более 0,1 мм, то при измерении сравнительно коротких радиусов ( $R < 1$  м) мы вводим погрешность  $\Delta L \sim 0,3$  мм, а при более длинных радиусах, благодаря провисанию рулетки и собственным ее ошибкам, неизбежным при большой длине, погрешность  $\Delta L$  может превысить 1 мм; впрочем, это не так уж плохо именно для больших радиусов.

Вторым недостатком является приближенное значение поправочных членов в формулах (125) и (126), точная же формула оказывается слишком громоздкой для практического применения.

Третьим недостатком является вхождение в эти формулы величин  $D$  и  $\delta$ , измеряемых нами также с некоторыми погрешностями  $\Delta D$  и  $\Delta \delta$ . Впрочем, нетрудно убедиться, что эти погрешности не так уж велики. Диаметр  $D$  мы без труда можем измерить с точностью  $\Delta D = 0,5$  мм; расстояние  $\delta$  постоянно для данного прибора и может быть измерено с точностью  $\Delta \delta = 0,1$  мм. Из формулы (126), находим, что:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta L}{R} + \frac{\Delta D \delta + \delta \Delta D}{4R^2}. \quad (129)$$

Используя выражение (129), решим две задачи, соответствующие первому и последнему случаю табл. 20.

**Задача 1.** Дано зеркало  $D = 250$  мм,  $R = 625$  мм.

Погрешности:  $\Delta L = 0,3$  мм,  $\Delta D = 0,5$  мм,  $\Delta \delta = 0,1$  мм.

Тепловой прибор имеет  $\delta = 8$  мм. Требуется определить погрешность  $\frac{\Delta R}{R}$ .

**Решение:**  $\frac{\Delta R}{R} = 0,048\% + 0,002\% = 0,05\%$ .

**Вывод:** В этом случае теневой метод в его простейшем виде оказался в два раза менее выгодным, чем метод сферометра. Объясняется это большой относительной погрешностью измерения величины  $L$ .

**Задача 2.** Дано зеркало  $D = 1000$  мм,  $R = 40\,000$  мм. Для такого длиннофокусного и крупного зеркала следует принять другие значения для погрешностей, а именно:  $\Delta L = 10$  мм,  $\Delta D = 1$  мм. Теневой прибор по-прежнему имеет  $\delta = 8$  мм и  $\Delta \delta = 0,1$  мм. Требуется определить погрешность  $\frac{\Delta R}{R}$ .

**Решение:**  $\frac{\Delta R}{R} = 0,025\% + 0,000002\% \approx 0,025\%$ .

**Вывод:** В этом случае теневой метод, даже в его простейшем виде, оказался в 64 раза выгоднее метода сферометра. Влияние второго члена формулы (129) исчезающе мало.

При решении этих задач мы учитывали только ошибки измерения отрезков, но не учли ошибки  $\Delta R_{\text{мн}}$  при фокусировке пока. Поэтому, в соответствии с табл. 21, в первой задаче следует взять для  $\Delta L$  не 0,3 мм, а 0,3013 мм, а во второй задаче не 10 мм, а 10,32. Отсюда делаем вывод, что чувствительность теневого метода настолько высока, что ошибки измерения радиуса кривизны практически зависят только от ошибок измерения отрезков  $\delta$ ,  $D$  и  $L$  (или  $BN$  в случае схемы рис. 82).

Измерение радиусов кривизны на нашей тепловой установке оказывается в десятки и сотни раз более точным, чем измерения тех же радиусов на сферометре, если только эти радиусы не слишком коротки.

К сожалению, тепловой метод не позволяет непосредственно и просто исследовать выпуклые поверхности; поэтому прямое измерение радиусов кривизны выпуклых поверхностей недоступно для теплового метода. Но так как обычно пробные стекла изготавливаются парами, а при наложении выпуклого пробного стекла на вогнутое обнаруживаются и измеряются по интерференционной картине отклонения поверхностей пробных стекол друг от друга, то, по крайней мере для случая пробных стекол, мы располагаем возможностью точно измерить теньвым методом радиус кривизны вогнутого стекла, а затем, учитывая показания интерференционной картины, пойти поправку и определить значение радиуса кривизны выпуклого стекла. В большинстве случаев такой поправкой можно пренебречь ввиду ее малости.

При изготовлении крупной астрономической оптики метод пробных стекол лишен практического смысла. Как же в этом случае измерить кривизну выпуклых поверхностей (например, поверхностей линз большого объектива)?

Такая задача вполне доступна для теплового метода в стадии тонкой шлифовки выпуклых поверхностей. Если оптическая поверхность выпуклая, то, очевидно, она шлифуется вогнутым шлифовальником, а при тонкой шлифовке в руках опытного мастера шлифовальник и шлифуемая поверхность имеют практически одинаковую кривизну.

Поэтому, полировав слегка металлический тонко отшлифованный шлифовальник, хотя бы по одному из его диаметров, и измерив теньвым методом кривизну шлифовальника, мы тем самым будем знать и кривизну тонко отшлифованной выпуклой поверхности.

За время полировки выпуклой поверхности опытный мастер не должен существенным образом изменить ее кривизну, а потому у законченной поверхности радиус кривизны будет близок к измеренному ранее радиусу кривизны шлифовальника.

Описанный метод удобен и вполне пригоден при изготовлении без помощи пробных стекол средних и крупных астрономических объективов. Пусть истинные кривизны линз такого объектива будут несколько отступать от предполагаемых нами.

Но, во-первых, такие отступления будут совершенно ничтожны; во-вторых, ошибки поверхностей линз, ошибки в измерении толщины линз и показателей преломления стекол, а также плавно оптические неоднородности стекол, все равно заставят нас предпринять ретушь одной из поверхностей линз объектива, в результате которой в значительной степени могут быть компенсированы не только дефекты стекла и формы поверхностей, но и дефекты от не вполне точного совпадения истинных радиусов кривизны с расчетными.

В помощь к описанному методу измерения кривизны крупных выпуклых поверхностей можно привлечь и метод пробного стекла в следующем виде, который проще всего пояснить на частном примере.

Допустим, что изготавливаемая выпуклая поверхность линзы имеет диаметр  $D = 800$  мм и радиус кривизны  $R = 5000$  мм\*). Изготовим вогнутое пробное стекло с радиусом кривизны 5000 мм, но с диаметром не 800 мм, а всего лишь 200 мм; такое пробное стекло довольно легко может быть изготовлено, а его наложение на испытываемую поверхность не сопряжено с особыми трудностями, с большим риском нанесения царапин и с заметной деформацией под действием собственного веса. Так как диаметр пробного стекла в 4 раза меньше диаметра испытываемой поверхности, то точность измерения кривизны окажется сниженной в 16 раз по сравнению с точностью измерения кривизны в случае равных диаметров пробы и изделия. Но так как чувствительность метода пробного стекла и связанная с ней точность измерения кривизны достаточно высока, то при уменьшенном диаметре пробного стекла мы будем знать радиус кривизны выпуклой поверхности с удовлетворительной точностью. Если испытываемая выпуклая поверхность имеет зональные или местные ошибки, то малое пробное стекло, наложенное на различные участки поверхности, будет обнаруживать различие кривизны на этих участках, и средняя кривизна поверхности определится в этом случае с значительным произволом и пониженной точностью; в этом случае метод малого пробного стекла уступает теневому методу измерения кривизны у шлифовальника. Но допустим, что выпуклая поверхность линзы и поверхность соответственного вогнутого шлифовальника имеют сферическую форму, после чего применим к измерению кривизны четыре возможных метода и сравним между собой результаты измерений.

**1. Метод кольцевого сферометра** (см. рис. 79). Дана поверхность  $D = 800$  мм,  $R = +5000$  мм и сферометр с кольцом  $2H = 200$  мм и с точностью измерения стрелки  $\Delta x = 2$  мкм; при этом величина  $H$  известна с точностью  $\Delta H = 2$  мкм (что было бы очень хорошо для такого крупного сферометра).

Выражение (114) дает нам  $x \approx 1$  мм.

\*) Случай, близкий к первой поверхности кроновой линзы 32-дюймового (812,8 мм) пулковского объектива.

Выражение (109) дает:

$$\Delta R = \frac{2\Delta H H x + \Delta x (H^2 - x^2)}{2x^2}. \quad (130)$$

Подставляя указанные выше численные значения для  $H$ ,  $x$ ,  $\Delta H$  и  $\Delta x$ , находим:

$$\Delta R = 10,2 \text{ мм.} \quad (131)$$

2. Метод сферометра Макеутова (см. рис. 81). Дана та же поверхность  $D=800$  мм,  $R=+5000$  мм, плоская линейка, ребро которой измерено с микрошпальной точностью, и два шарика с диаметрами  $d_1=d_2=16$  мм  $\pm 2$  мкм. Поэтому для выражения (122) примем  $\Delta d=5$  мкм, тогда как для  $\Delta L$  можно принять  $\Delta L=0,5$  мм. Выражение (124) дает нам  $L=800$  мм. Подставляя заданные и найденные величины в выражение (122), находим:

$$\Delta R = 7,8 \text{ мм.} \quad (132)$$

Иными словами, в данном случае сравнительно большой кривизны применение моего сферометра не на много выгоднее применения большого кольцевого сферометра.

3. Метод малого пробного стекла. Дано пробное стекло диаметра  $D_1=200$  мм и радиуса кривизны  $R=-5000$  мм. Этот радиус кривизны, конечно, измерен не на сферометре, а тепловым методом по схеме рис. 83; в противном случае точность измерения была бы слишком низкой. Припавая с достаточным правдоподобием в формуле (129):  $\Delta L=1$  мм,  $\Delta D_1=0,5$  мм,  $\Delta \delta=0,1$  мм и  $\delta=8$  мм, а также используя выражение (128), находим:

$$\Delta R, = 1,1 \text{ мм.} \quad (133)$$

Наложив пробу на выпуклую поверхность линзы, мы в белом свете можем сосчитать не более 6 интерференционных колец, а это значит, что отступление поверхности от пробы на ее внешней зоне или в центре пробы не должно превышать 1,7 мкм. При таком условии и радиус кривизны ( $R$ ) поверхности не должен отличаться от радиуса ( $R_1$ ) пробного стекла больше чем на:

$$R - R_1 = \pm 0,0017 \frac{8R^2}{D_1^2} = \pm 8,5 \text{ мм,} \quad (134)$$

а это значит, что данное пробное стекло применимо к исследованию кривизны поверхности с ранее найденной нами точностью только в тех случаях, когда радиус кривизны поверхности заключен в пределах между  $R'=4991,5$  мм и  $R''=5008,5$  мм. Между тем, при всех остальных методах измерения мы не связаны с абсолютным значением измеряемого радиуса кривизны.

При наложении пробы мы производим счет интерференционных колец, и когда этих колец много (2—6), мы вряд ли считаем их с точностью до  $\frac{1}{4}$  кольца. Такой погрешности подсчета



числа колец соответствует ошибка в измерении радиуса кривизны:

$$\Delta'R = 0,4 \text{ мм.} \quad (135)$$

Поэтому мы измерим радиус кривизны в лучшем случае с ошибкой:

$$\Delta R = \Delta'R + \Delta R_1 = 1,5 \text{ мм.} \quad (136)$$

4. Теневой метод измерения кривизны шлифовальника (см. рис. 83). Дан шлифовальник диаметра  $D = 800$  мм и радиуса кривизны  $R = -5000$  мм. Этот шлифовальник полировал до появления первых следов зеркального отражения (хотя бы только по одному диаметру шлифовальника).

При тех же погрешностях, что и в предыдущем примере, на основании выражений (129) и (128) имеем:

$$\Delta R = 1,0 \text{ мм,} \quad (137)$$

причем поправка за счет выражения (128) оказалась исчезающе малой (8 мкм) при принятой нами точности определения  $\Delta'R_{\text{шл.}}$ .

Сличая выражения (131), (132), (136) и (137), мы видим, что самым чувствительным методом оказался четвертый; он, кроме того, был бы и самым лучшим, так как он способен оценить «среднюю» кривизну в случае не строго-сферической поверхности. К сожалению, у нас нет полной гарантии, что за время полировки выпуклой поверхности линзы ее кривизна не претерпит заметного изменения, и что кривизна шлифовальника была действительно в точности равна кривизне изделия.

Поэтому не исключена возможность применения любого из четырех методов измерения кривизны: в одних случаях одни методы будут явно более выгодными, в других случаях, как, например, в рассмотренном нами, все четыре метода приблизительно равноценны или, во всяком случае, применение теневого метода в его простейшей форме не дает разительного преимущества по сравнению с методом сферометра. Выбор метода зависит от величины диаметра и радиуса кривизны испытываемой выпуклой поверхности.

Если же говорить о вкусах, то я в большинстве случаев предпочитаю обходиться без пробных стекол и сферометров: кривизну вогнутых поверхностей я измеряю непосредственно теневым методом, а кривизну выпуклых поверхностей — посредством такого же измерения кривизны шлифовальника, прошедшего последнюю стадию точкой шлифовки совместно с выпуклой поверхностью изделия при условии, что шлифовальник и изделие хорошо пришлифовались друг к другу по всей поверхности.

Такой метод хорош уже тем, что он очень прост и не требует никакой дополнительной аппаратуры, кроме теневого прибора, без которого успешные работы по астрономической оптике вообще невозможны.

Измерение очень малых кривизн. Такое измерение является специфическим и часто оказывается непосильным как для метода сферометра, так и для тепевого метода, а потому требует особого решения. Исследуем этот вопрос на частном примере. Например, требуется измерить радиус кривизны  $R = 100$  м при диаметре поверхности  $D = 200$  мм.

Вычисления показывают, что в этом случае стрелка кривизны  $x = 0,05$  мм  $= 50$  мкм. Применяя для измерения кривизны описанный выше кольцевой сферометр, мы измерим стрелку  $x = 50$  мкм с погрешностью  $\Delta x = 2$  мкм, а значит, и радиус кривизны  $R = 100$  м будет определен с ошибкой:

$$\Delta R = 4 \text{ м} = 4000 \text{ мм.} \quad (138)$$

Применение моего сферометра (рис. 80) невозможно, так как не существует точных шариков с диаметром порядка 50 мкм. Можно, правда, заменить в этом методе шарик «щупом», но и его толщина будет известна не более чем с микроной точностью, а потому, с учетом ошибок линейки, точность измерения радиуса кривизны не будет выше  $\Delta R \approx 4$  м (138).

Можно положить на испытуемую поверхность пробное плоское стекло и сосчитать число колец интерференции, а отсюда определить величину стрелки  $x$  и радиуса кривизны  $R$ . Но при стрелке  $x = 50$  мкм число колец будет около двухсот. Ширина колец на внешней зоне будет микроскопически мала; счет числа колец будет затруднен и ненадежен; наконец, для наблюдения такого числа колец белый свет является непригодным и должен быть заменен монохроматическим. Все же описанный сейчас метод может быть применен для измерения малых кривизн и его следовало бы рекомендовать, если бы не нашлось другого более выгодного метода.

Теневой метод в описанной выше форме также неприменим, так как для его применения потребовалось бы испытательное помещение длиной более 100 м, и в этом помещении необходимо было бы создать температурные условия, предохраняющие от возникновения крайне вредных конвекционных потоков воздуха, что затруднительно. Можно, правда, уменьшить длину испытательного помещения (но не длину хода лучей в турбулентном воздухе) вдвое, применив вспомогательное плоское зеркало  $B$ , расположенное на расстоянии половины  $R$  от вогнутой испытуемой поверхности  $A$  и теневого прибора  $N$ , как это показано на рис. 84. Однако это не решение задачи, так как то, что может оказаться возможным для  $R = 100$  м, окажется невозможным для  $R = 200$  м. По допустим на время, что мы располагаем чрезвычайно длинным испытательным помещением со спокойным и однородным воздухом. Фокусировку луча в нашем случае мы

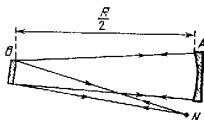


Рис. 84.

можем осуществить с точностью  $\pm 50$  мм, согласно (128). С какой же точностью мы можем рассчитывать быстро и просто измерить расстояние 100 м с помощью рулетки? Вряд ли с точностью, большей  $\pm 50$  мм. А потому ошибка в измерении радиуса кривизны окажется близкой к

$$\Delta R \approx 100 \text{ мм.} \quad (139)$$

Отсюда заключаем, что для данного случая тепевой метод в простейшем его виде был бы выгоднее метода сферометра приблизительно в 40 раз.

Наконец, в данном распоряжении остается еще «метод наклонных пучков», о котором следует сказать более подробно, тем более, что он пригодится нам в дальнейшем при исследовании плоских зеркал.

Направим на выпуклую или вогнутую поверхность  $ABC$  малой кривизны (рис. 85) гомоцентрический пучок, исходящий из точки  $M$ , отстоящей от вершины  $B$  поверхности на расстоянии  $MB = L$ . Пусть  $OB = R$  — радиус кривизны поверхности и пусть  $w$  — угол падения центрального луча пучка на поверхность.

Если бы поверхность  $ABC$  была плоской, то отраженный пучок дал бы мнимое изображение точки  $M$  в точке  $M'_0$ , причем  $M'_0 = MB = L$ .

Кривизна поверхности  $ABC$  изменит ход лучей отраженного пучка и сделает его астигматическим: изображение точки  $M$  для лучей меридионального сечения

(плоскость рис. 85) окажется в точке  $M'_m$ , тогда как изображение той же точки для лучей сагиттального сечения (в плоскости перпендикулярной рисунку) окажется в точке  $M'_s$ . В случае выпуклой поверхности точки  $M'_m$  и  $M'_s$  окажутся между вершиной  $B$  и точкой  $M'_0$ ; в обратном случае точки  $M'_m$  и  $M'_s$  окажутся за точкой  $M'_0$  на продолжении  $BM'_0$ ; при этом ближайшей к точке  $M'_0$  всегда будет точка  $M'_s$ .

Введи обозначения:

$$M'_0 M'_m = \Delta_m, \quad M'_0 M'_s = \Delta_s,$$

$$M'_s M'_m = \Delta_{sm} \quad (\text{астигматическая разность}),$$

находим для них следующие зависимости:

$$\Delta_m = \frac{2L^2}{R \cos w + 2L}, \quad (140)$$

$$\Delta_s = \frac{2L^2}{\frac{R}{\cos w} + 2L}, \quad (141)$$

$$\Delta_{sm} = \frac{2L^2 \sin w \cdot \operatorname{tg} w}{R + 2L \left( \cos w + \frac{1}{\cos w} \right) + \frac{4L^2}{R}}. \quad (142)$$

Измерение  $\Delta_{sm}$  оказывается возможным лишь в случае мнимой точки  $M$ , т. е. сходящегося гомоцентрического пучка, падающего на испытываемую поверхность, а потому мы не можем использовать выражения (142) в практических схемах измерения радиуса кривизны.

Но можно поступить следующим образом: в точке  $D$  расположить объектив с фокусом  $F$  и фокусным расстоянием  $f$  и получить с помощью такого объектива астигматическое изображение точки  $M$ ; причем  $M_s$  изобразится в точке  $s$ ,  $M'_m$  изобразится в точке  $m$ , а астигматическая разность  $\Delta_{sm}$  трансформируется в новую астигматическую разность  $sm$ .

Выражение для  $sm$  принимает следующий вид:

$$sm = \frac{f^2 \cdot \Delta_{sm}}{(L - \Delta_m)(L - \Delta_s) + (BD - f)(2L - \Delta_m - \Delta_s) + (BD - f)^2}. \quad (143)$$

Подставив сюда  $\Delta_m$ ,  $\Delta_s$  и  $\Delta_{sm}$  из выражений (140), (141), (142), мы бы могли определить  $R$ . Но выражение для  $R$  окажется слишком сложным и неудобным для целей практических; кроме того, ошибки в измерении отрезков  $L$  и  $BD$  снизят точность результата.

Но дело значительно упрощается, если  $L = \infty$ , т. е. если на испытываемую поверхность  $ABC$  (рис. 85) падает параллельный пучок под тем же углом  $w$ . В этом случае мы имеем:

$$L - \Delta_m = \frac{R \cos w}{2}, \quad L - \Delta_s = \frac{R}{2 \cos w}, \quad \Delta_{sm} = \frac{R \sin^2 w}{2 \cos w}. \quad (144)$$

Поэтому выражение (143) переписывается в виде:

$$sm = \frac{2f^2 \sin^2 w}{R \cos w + 2(BD - f)(1 + \cos^2 w) + \frac{4(BD - f)^2 \cos w}{R}}. \quad (145)$$

Так как  $(BD - f) \ll R$ , то последнее выражение может быть переписано в следующем приближенном виде:

$$sm \approx \frac{2f^2 \sin w \cdot \operatorname{tg} w}{R}, \quad (146)$$

откуда

$$R \approx \frac{2f^2 \sin w \cdot \operatorname{tg} w}{sm}, \quad (147)$$

где  $sm$  — астигматическая разность, наблюдаемая у изображения точки вблизи фокуса  $F$  объектива  $D$ .

Заметим, что выражения (146) и (147) из приближенных обра-  
щаются в точные, когда  $BD = f$ , что следует из (145).

Как же осуществить такую схему измерения радиуса? Для этого (рис. 86) установим наклонно к испытуемой поверхности  $A$

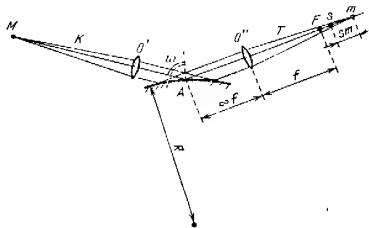


Рис. 86.

коллиматор  $K$  с объективом  $O'$ , в фокусе которого находится све-  
тящаяся точка  $M$ .

Из коллиматора выйдет параллельный пучок лучей ( $L = \infty$ ),  
который упадет на поверхность, а затем отразится от нее под  
углом  $\omega$ . Отраженный астигматичный пучок упадет далее на  
объектив  $O''$  трубы  $T$ ; пусть фокусное расстояние объектива  $O''$   
равно  $f$ . Лучи меридионального сечения сфокусируются в  $m$ ,  
образуя здесь линию (фокаль), перпендикулярную плоскости ри-  
сунка (горизонтальную), лучи же сагитальные сфокусируются  
в  $s$ , где образуется линия (фокаль) в плоскости рисунка (верти-  
кальная линия). Фокусируя сильный окуляр или нож Фуко  
сперва на фокаль  $m$ , а затем на фокаль  $s$ , мы можем измерить  
астигматическую разность  $sm$ ; зная, кроме того, угол  $\omega$  и фо-  
кусное расстояние  $f$  объектива трубы, мы вычисляем радиус  
кривизны  $R$  по формуле (147); если объектив  $O''$  удалить от  
поверхности  $A$  на расстояние, равное  $f$  или достаточно к нему  
близкое, то последняя формула из приближенной превратится  
в точную.

По этому принципу и для этих целей мною были спроекти-  
рованы и построены в ГОИ в 1937 г. приборы, позволяющие  
точно измерить астигматическую разность  $sm$  и угол  $\omega$ , а зна-  
чит, и точно измеряющие  $R$ , поскольку константа  $f$  прибора  
известна.

Простейший из этих приборов обладал следующими характе-  
ристиками: диаметр объективов  $O'$  и  $O''$  равен 75 мм; фокус  
объективов  $f = 640$  мм; точность измерения угла  $\Delta\omega$   $0^{\circ},1$ ; точ-

ность измерения астигматической разности  $\Delta sm$  0,05 мм; фокусное расстояние  $f$  известно с точностью 0,5 мм.

Эти характеристики позволяют подсчитать точность измерения радиуса. В нашем случае, при  $R = 100$  м и  $D = 200$  мм, оказывается, что

$$\Delta R \approx 1000 \text{ мм.} \quad (148)$$

Заметим, что для полного использования отверстия объективов в нашем случае приходится взять угол падения  $w \approx 68^\circ$ ; при этом астигматическая разность оказывается  $sm \approx 18,8$  мм.

Сравнивая перечисленные методы измерения кривизны для данного частного случая: (138), (139), (148), мы убеждаемся, что метод наклонных пучков оказался в  $\sim 4$  раза выгоднее метода сферометра и в то же время он в  $\sim 10$  раз уступает теневому методу в его простейшем виде. К сожалению, из-за большой необходимости длины испытательного помещения теневой метод неприменим, а потому для измерения малых кривизн мы можем с успехом применить метод наклонных пучков.

Этот метод имеет одно существенное преимущество перед тепевым методом и методом пробного стекла: он позволяет исследовать не только отполированную, но и матовую поверхность во время ее топкой (а иногда и грубой) шлифовки, так как матовая поверхность, оказывается способной отражать лучи при  $w$ , приближающемся к  $90^\circ$ .

Как ни велика с виду абсолютная погрешность  $\Delta R = 1000$  мм, но она не так уже страшна, если перенести ее в погрешность  $\Delta x$  определения стрелки кривизны поверхности; согласно (127), при  $\Delta R = 1000$  мм, мы имеем в данном случае:

$$\Delta x = 0,5 \text{ мкм.} \quad (149)$$

Читатель видит, что метод наклонных пучков применим к исследованию плоскостей не только отполированных, но и матовых, например, плоских зеркал в процессе шлифовки, плоских шлифовальных (плашайб), точных линеек (например, для моего сферометра), направляющих у станков и т. д. Отсутствие астигматической разности  $sm$  (147) говорит о плоской форме поверхности; в противном случае по  $sm$  измеряется кривизна и стрелка кривизны ( $x$ ) поверхности. При длине поверхности  $\sim 1$  м стрелка кривизны определяется с микронной точностью и выше; с такой же точностью удастся выполнить доводку плоской поверхности.

Метод наклонных пучков позволяет следить за формой плоского изделия и плашайбы не только в конечной, но и в начальной стадии обработки и вовремя принимать соответственные меры с тем, чтобы к концу топкой шлифовки поверхность оказалась плоской с высокой точностью. Тем самым мы в значительной степени сокращаем сроки полировки, направленной на придание изделию плоской формы поверхности.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОГНУТЫХ СФЕРИЧЕСКИХ И ПЛОСКИХ ЗЕРКАЛ

**1. Сферические зеркала.** Исследование вогнутого сферического зеркала сводится к исследованию формы его поверхности и к измерению его кривизны. В каждом частном случае задаются техническими условиями допуски на отклонения от сферической формы и допуски на отклонения кривизны. Если зеркало выполняется в виде «изделия», то к нему, кроме того, предъявляются требования «чистоты», т. е. устранения следов мата от предшествовавшей полировке тонкой шлифовки и устранения царапин в той или иной мере. Если же зеркало предназначено для лабораторных целей в качестве вспомогательного, то на его поверхности можно допустить и грубые царапины и неполную «сгонку мата». Таким образом, требования чистоты поверхности являются второстепенными и не всегда обязательными, а простота контроля «на чистоту» позволяет о нем здесь вовсе не говорить.

Задавшие требования точной формы и точной кривизны выполняются оптиком в процессе шлифовки и полировки под контролем различных описанных ранее методов. Наконец, зеркало готово, и контролер, если мы не доверим мастеру-оптику, должен убедиться, что технические условия выдержаны правильно,

и выдать паспорт на зеркало с количественной оценкой формы поверхности и радиуса кривизны.

В этом случае всего удобнее и выгоднее применить теневой метод по схеме рис. 87. Здесь испытуемое зеркало *A* расположено вертикально, и в случае крупных размеров зеркала его выгоднее всего подвесить на ремне или на стальной ленте *1* при трех опорных

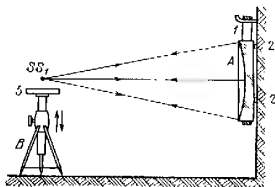


Рис. 87.

точках *2* сзади, осуществив таким образом наиболее совершенную разгрузку.

На расстоянии радиуса кривизны *R* устанавливаем трехногий жесткий штатив *B* с подъемным столиком *З*, на котором устанавливаем теневой прибор, изображенный на рисунке в виде светящейся точки *S* и ее изображения *S*<sub>1</sub>, перекрываемого лез-

нием пожа. Грубые перемещения штатива  $B$  и грубый подъем его столика  $З$ , а затем тонкие перемещения тепевого прибора  $SS_1$ , предусмотренные его конструкцией, позволяют привести изображение точки на лезвие пожа так, что  $S$  и  $S_1$  лежат на горизонтальной линии, перпендикулярной оси зеркала  $A$ .

Допустим, что зеркало  $A$  не имеет строго-сферической формы. В таком случае вместо плоского рельефа мы будем наблюдать некоторую тепевую картину (тепевой рельеф). Ошибки поверхности могут быть зональными, азимутальными и местными.

Зональные ошибки обнаруживаются при любой ориентировке пожа, тогда как азимутальные и местные ошибки при некоторых ориентировках пожа могут оказаться незаметными.

Начнем с исследования зональных ошибок, предположив, что двух других видов ошибок нет. Для этого производим жирным карандашом разметку зон на горизонтальном диаметре зеркала  $A$ , установив, например, 6 зон и располагая их все более тесно по мере приближения к краю зеркала (рис. 88). Радиус каждой зоны ( $y_i$ ) нами измеряется линейкой, но крайней мере с точностью до 1 мм. Диаметр зеркала  $D = 2H$ , где  $H$  — радиус его внешней зоны.

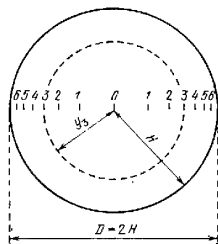


Рис. 88.

Такая разметка зон, введенная мной в практику в 1921—1922 г., значительно выгоднее зональных диафрагм (Дрепнер, Ричи и др.), так как тепевая картина при этом не экранируется и дифракционные помехи, снижающие чувствительность фокусировки пожа, вполне устраняются.

Мы помним, что зона зеркала представляется в виде кольца полутени на фоне тепловой картины любой сложности в том случае, когда точка  $S$ , совмещенная со своим изображением  $S_1$  и лезвием пожа, находится в точности в центре кривизны данной зоны. Поэтому, перемещая тепевой прибор с помощью продольного суппорта, мы находим шесть таких фокусировок, при которых кольца полутени проходят (последовательно или скачкообразно) через шесть размеченных на зеркале зон.

Так, на рис. 89,  $a$  изображена некоторая тепевая картина при фокусировке тепевого прибора на третью зону ( $y_3$ ).

Вспомним, что первый метод щели и пили позволяет еще более уверенно выполнить ту же фокусировку (рис. 89,  $b$ ).

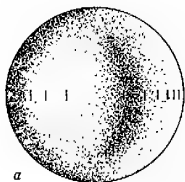
К шести (или к другому числу) размеченных нами зон следует еще добавить вершину зеркала ( $y_0 = 0$ ) или, вернее, параксимальную его область и отфокусировать тепевой прибор на центр ее кривизны; при этом, в случае пожа, тепевая картина представится в виде полутепевой площадки в центре зеркала



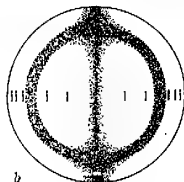
(рис. 89, с) независимо от характера теневой картины на остальной поверхности зеркала.

Продольный суппорт теневого прибора, снабженный точным микрометрическим винтом с барабаном или точной шкалой с отсчетным приспособлением, позволяет измерить отступления центров кривизны различных зон друг от друга. По этим отступлениям можно вычислить отклонения поверхности зеркала от любой сферы сравнения\*). Здесь мы рассмотрим только один частный случай, когда сфера сравнения имеет радиус кривизны  $R_0$ , равный радиусу кривизны параксимальной области зеркала.

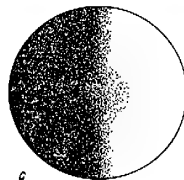
Изобразим на рис. 90 сечение поверхности зеркала в виде кривой  $ABC$ , имеющей радиус кривизны при вершине ( $B$ ) равный  $R_0$ ; соответственно этому радиусу проведем сферу сравнения  $MBN$  и определим отклонения  $\delta_y$  реальной поверхности зеркала от сферы сравнения для любой зоны  $y$ . Отклонения  $\delta_y$  характеризуют асферичность зеркала. Дальнейшие выводы будут приближенными, так как величинами второго порядка малости мы будем пренебрегать.



a



b



c

Рис. 89.

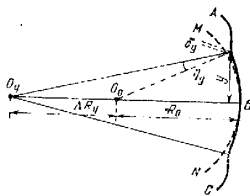


Рис. 90.

Измерив на теневом приборе  $\Delta R_y$  — отклонение центра кривизны  $O_y$  зоны  $y$  от центра  $O_0$  параксимальной области зеркала, мы определим угол:

$$\eta_y = \frac{y \Delta R_y}{R_0^2} \quad (150)$$

\*) Максудов Л. Д. Теневые методы исследования оптических систем. — Проблемы новейшей физики, 1934, вып. XXIII.

Считая, что форма поверхности зеркала изменяется достаточно плавно, мы находим величину отклонения:

$$\delta_y = \int_0^y \eta_y dy. \quad (151)$$

Так как число избранных зон, предшествовавших зоне  $y$  не бесконечно велико и так как величина  $\eta_y$  изменяется произвольно, а не по какой-нибудь математической зависимости, то мы можем выполнить лишь приближенное интегрирование (численное или графическое). Численное приближенное интегрирование проще всего рассмотреть на каком-нибудь частном примере, хотя бы и вымышленном. Так, допустим, что испытуемое зеркало имеет  $D = 200$  мм и  $R_0 = 1000$  мм и разбито на 6 зон; радиусы  $y$  этих зон, а также экспериментально измеренные отрезки  $\Delta R_y$  указаны в табл. 22, которую мы развиваем в соответствии с (150) и (151) до получения окончательного результата в последней строке таблицы; при этом выражение (151) принимает вид:

$$\delta_y = \sum_0^y \eta_y \Delta y. \quad (152)$$

К табл. 22 необходимо дать лишь небольшие пояснения: в 4-й строке  $\eta_y$  (среднее) является средним арифметическим из значений  $\eta_y$  3-й строки для каждого данного и предыдущего столбца; в 5-й строке фигурирует  $\Delta y$  — приращение зоны вместо  $dy$  — соответствующего дифференциала; в 7-й строке  $\sum_0^y$  (сумма)

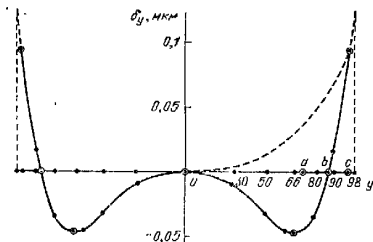


Рис. 91.

замещает  $\int_0^y$  (интеграл). В последней строке асферичность  $\delta_y$  выражена в микрометрах и позволяет нам построить кривую формы поверхности зеркала на рис. 91. Край зеркала (два последних миллиметра) оказался неисследованным. Зеркало имеет

[ $R_0 = 1000$  мм]

|   |                                       | 0 | 1                    | 2                     | 3                      | 4                         | 5                     | 6                      |            |
|---|---------------------------------------|---|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|------------|
| 1 | $y$                                   | 0 | 30                   | 50                    | 66                     | 80                        | 90                    | 98                     | Миллиметры |
| 2 | $\Delta R_y$                          | 0 | $+0,02$              | $+0,03$               | $\pm 0,01$             | $-0,03$                   | $-0,08$               | $-0,12$                | Миллиметры |
| 3 | $\eta_y$                              | 0 | $-0,6 \cdot 10^{-6}$ | $-1,5 \cdot 10^{-6}$  | $-0,66 \cdot 10^{-6}$  | $+2,4 \cdot 10^{-6}$      | $+7,2 \cdot 10^{-6}$  | $+11,76 \cdot 10^{-6}$ | Раднаны    |
| 4 | $\eta_y$ (средн.)                     | — | $-0,3 \cdot 10^{-6}$ | $-1,05 \cdot 10^{-6}$ | $-1,08 \cdot 10^{-6}$  | $\pm 0,87 \cdot 10^{-6}$  | $+4,8 \cdot 10^{-6}$  | $+9,47 \cdot 10^{-6}$  | Раднаны    |
| 5 | $\Delta \eta$                         | — | 30                   | 20                    | 16                     | 14                        | 10                    | 8                      | Миллиметры |
| 6 | $\eta_y$ (средн.) $\Delta y$          | — | $-9 \cdot 10^{-6}$   | $-21 \cdot 10^{-6}$   | $-17,28 \cdot 10^{-6}$ | $\pm 12,18 \cdot 10^{-6}$ | $+48 \cdot 10^{-6}$   | $+75,84 \cdot 10^{-6}$ | Миллиметры |
| 7 | $\sum_0^y \eta_y$ (средн.) $\Delta y$ | 0 | $-9 \cdot 10^{-6}$   | $-30 \cdot 10^{-6}$   | $-47,28 \cdot 10^{-6}$ | $-35,1 \cdot 10^{-6}$     | $+12,9 \cdot 10^{-6}$ | $+88,74 \cdot 10^{-6}$ | Миллиметры |
| 8 | $\delta_y \sim$                       | 0 | $-0,009$             | $-0,030$              | $-0,047$               | $-0,035$                  | $+0,013$              | $+0,089$               | МММ        |

сильно приподнятый край ( $\delta_{\text{вс}} = +0,089$  мкм) и углубленную промежуточную зону ( $\delta_{\text{то}} = -0,048$  мкм). При принятой нами сфере сравнения наибольшая асферичность  $\delta_{\text{max}} = 0,137$  мкм.

Так как для первоклассного зеркала допускается  $\delta_{\text{max}} = \frac{\lambda}{8}$ , т. е. при  $\lambda = 0,555$  мкм  $\delta_{\text{max}} = 0,07$  мкм, то данное зеркало оказывается в  $\sim 2$  раза ниже первоклассного. При переходе от избранной сферы сравнения с радиусом кривизны  $R_0$  к ближайшей сфере сравнения оценка качества зеркала несколько повышается, так как в этом случае оказывается, что  $\delta_{\text{max}}^0 \approx 0,09$  мкм (без учета последних двух миллиметров по краю зеркала).

Посмотрим, как высока будет точность такого количественного исследования формы поверхности зеркала при условии достаточной плавности формы.

Для этого в табл. 23, являющейся продолжением табл. 22 и сохраняющей ту же нумерацию столбцов и строк, приведем

Т а б л и ц а 23

|          |                                                           | 0          | 1              | 2              | 3              | 4               | 5               | 6               |                             |
|----------|-----------------------------------------------------------|------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| 1        | $\Delta(y)$ (относит.)                                    |            | 0,0333         | 0,0200         | 0,0151         | 0,0125          | 0,0111          | 0,0102          |                             |
| 2        | $\Delta(\Delta y)$<br>(абсолют.)<br>(относит.)            |            | 0,0657<br>3,28 | 0,0300<br>1,00 | 0,0215<br>2,15 | 0,0178<br>0,594 | 0,0162<br>0,202 | 0,0154<br>0,128 | Милли-<br>метры             |
| 3        | $\Delta(\eta_y)$<br>(абсолют.)<br>(относит.)              | $\sim 2,0$ | 3,31<br>1,99   | 1,02<br>1,53   | 2,17<br>1,43   | 0,607<br>1,45   | 0,213<br>1,53   | 0,138<br>1,62   | $\times 10^{-6}$<br>рад/ап. |
| 4        | $\Delta(\eta_{\text{среди}})$<br>(абсолют.)<br>(относит.) |            | 2,00<br>0,67   | 1,76<br>1,68   | 1,48<br>1,37   | 1,44<br>1,66    | 1,48<br>0,308   | 1,585<br>0,167  | $\times 10^{-6}$<br>радиан. |
| 5        | $\Delta(\Delta y)$<br>(относит.)                          |            | 0,033          | 0,050          | 0,063          | 0,071           | 0,100           | 0,125           |                             |
| 6        | $\Delta(\eta_y/\Delta y)$<br>(абсолют.)<br>(относит.)     |            | 0,70<br>0,060  | 1,73<br>0,036  | 1,43<br>0,025  | 1,73<br>0,021   | 0,408<br>0,020  | 0,292<br>0,022  | мкм                         |
| 7 и<br>8 | $\Delta\delta_y$ (абсолют.)                               |            | 0,060          | 0,096          | 0,121          | 0,142           | 0,162           | 0,184           | мкм                         |

погрешности измерения соответствующих величин. Эти погрешности будем обозначать символом  $\Delta$  перед соответственной величиной: так,  $\Delta\eta$  и  $\frac{\Delta\eta}{\eta}$  соответственно будут абсолютной и относительной погрешностью измерения величины  $\eta$ .

Мы уже установили, например, что  $y$  измеряется с точностью  $\pm 1$  мм; поэтому в первой строке таблицы дано  $\Delta(y) = 1$  мм. Точность фокусировки пока тепевого прибора мы выясним для

каждой зоны по выражению (128), полагая в нем  $D = 2y$ ; пользуясь для этой цели выражением (128), мы, по-видимому, не преувеличиваем чувствительности фокусировки, но мы бы со- явно преувеличили, если бы воспользовались для тех же целей выражением (127), так как при фотометрировании двух удален- ных друг от друга участков теневой картины мы, конечно, не используем максимальной контрастной чувствительности глаза ( $\gamma_0 = 1,5\%$ ). Сушпорт теневой прибора позволяет измерять пере- фокусировки пока с точностью 0,01 мм; поэтому ошибка в из- мерении  $\Delta R_0$  складывается из двух последних ошибок: ошибки фокусировки пока и ошибки измерения перемещения прибора на сушпорте.

Наконец, радиус  $R_0$  настолько велик по сравнению с ошиб- кой его измерения, как мы это видели раньше, что погрешностью  $\Delta(R_0)$  можно вполне пренебречь, не вводя ее в расчеты. После этого составляем табл. 23.

Последняя строка определяет точность измерения  $\delta_u$ . Для внешней зоны  $\Delta\delta$  в 2,6 раза превышает допуск 0,07 мкм на ошибки поверхности первоклассного зеркала, а потому, строго говоря, описанная нами количественная форма теневой метода непригодна для исследования перво- классного зеркала заданного диамет- ра и радиуса.

Правда, мы были достаточно, а может быть и слишком, строги при составлении табл. 23, предполагая, что ошибки всегда только склады- ваются и никогда не вычитаются од- на из другой; поэтому на внешней зоне и накопилась очень большая ошибка.

Перейдем от численного решения задачи к графическому методу. Для этого на рис. 92 построим кривую  $\eta_u = \varphi(y)$  согласно 3-й строке табл. 22. Интеграл этой функции, со- гласно (151), равен  $\delta_u$ . Поэтому, для нахождения  $\delta_u$  следует определить величину площади, ограниченной па- шей кривой, осью ординат и уров- ней кривой.

Наконец, для внешней зоны  $c = 98 \delta_0$  определяется пло- щадью III. Площади I и III пропорциональны ординатам рис. 91 для точек а и с, т. е. -0,048 мкм и +0,089 мкм. Площади I, II и III или I и II + III, или любые части этих площадей, могут

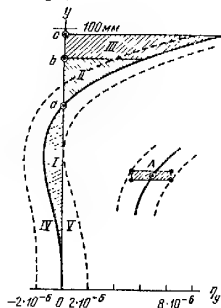


Рис. 92.

нем зоны  $y$ . Так, на зоне а  $\delta_a$  равно площади I, причем эта площадь отрицательна, так как лежит влево от оси ординат; на этой зоне  $\delta_u$  очевидно, проходит через минимум. Зону b мы выбрали так, что площадь II численно равна и противоположна по знаку площади I; поэтому  $\delta_b = 0$ .

Наконец, для внешней зоны  $c = 98 \delta_0$  определяется пло- щадью III. Площади I и III пропорциональны ординатам рис. 91 для точек а и с, т. е. -0,048 мкм и +0,089 мкм. Площади I, II и III или I и II + III, или любые части этих площадей, могут

быть нами измерены на чертеже; а так как вертикальный и горизонтальный масштабы чертежа нам известны, то асферичности  $\delta_v$  могут быть вычислены. Теперь можно перейти к анализу погрешностей.

Для этого отдельно в правой части рисунка изображена некоторая точка  $A$ , лежащая где-то на кривой основного чертежа рисунка. Истинное положение точки  $A$  может находиться в любой точке заштрихованного прямоугольника, у которого половина основания равна погрешности в определении  $\eta_v$ , а половина высоты — погрешности в определении  $y$ . Третья строка табл. 23 убеждает нас, что независимо от  $\eta_v$  и почти независимо от значения зоны  $y$  точность измерения  $\eta_v$  близка к  $1,4 \cdot 10^{-6} = 2,0 \cdot 10^{-6}$  радиана (т. е.  $\sim 0",3-0",4$ ). Между прочим, это нам и позволило в нулевом столбце табл. 23 проставить в 3-й строке число:  $\sim 2,0 \cdot 10^{-6}$ . Итак, из 3-й строки табл. 23 мы знаем размеры полуоснования заштрихованного прямоугольника возле точки  $A$ . Полувысота заштрихованного прямоугольника очевидно равна 1 мм, так как мы условились, что зоны  $y$  измеряются с точностью  $\pm 1$  мм. Проводя прерывистые кривые, как показано на рисунке, мы устанавливаем границы, за которые не может выйти истинная кривая  $\eta_v = \varphi(y)$ .

Таким образом, на основном чертеже рисунка мы можем добавить две прерывистые границы и найти площади  $IV$  и  $V$  двух лент, практически равноудельных. Каждая из этих площадей, если их построить и измерить, приблизительно равна  $0,160-0,170$  мкм, и это значит, что  $\delta_v$  для внешней зоны и в самом неблагоприятном случае может быть измерена с точностью  $\pm 0,160 \pm 0,170$  мкм, что хорошо согласуется с последней строкой табл. 23. Точность  $\sim 0,16-0,18$  мкм недостаточна, как было сказано, для исследования формы первоклассного зеркала, и мы можем лишь надеяться, что истинная кривая  $\eta_v = \varphi(y)$  не прилегает на всем протяжении к одной из двух границ, но проходит где-то и как-то в промежутке между этими границами, приближаясь к экспериментальной кривой; в этом случае площадь, определяющая ошибку  $\Delta\delta_v$ , будет меньше площади  $IV$  или  $V$ .

В отношении чувствительности фокусировки пока заметим еще следующее. Чем больше первая производная  $\eta_v = \varphi(y)$ , тем уже кольцо тени (рис. 89,  $b$ ) или полутени (рис. 89,  $a$ ) на теневой картине и тем чувствительнее можно совместить его середину с избранным штрихом.

Поэтому заштрихованный прямоугольник возле точки  $A$  (рис. 92) без учета выражения (128) имел бы различные высоты: значительно большие, чем мы приняли — у внутренних зон и лишь незначительно большие — у внешних зон. Прерывистые границы рис. 92 из-за этого должны были бы несколько сдвинуться, а площади  $IV$  или  $V$ , определяющие ошибку  $\Delta\delta$ , несколько увеличиться.

Возникает вопрос, на много ли они увеличатся? Увеличатся они не намного по следующим причинам. Там, где первая про-

изводная  $\eta_y = f(y)$  мала, кривая составляет малый угол с осью ординат, а потому даже значительные смещения точек кривой вверх или вниз от номинального значения  $y$  вызывают очень малые смещения прерывистых границ рис. 92. Там же, где первая производная нашей функции велика (от 3-й и до 6-й зоны), вертикальные смещения точек кривой будут незначительными благодаря возросшей чувствительности наводки кольца теневой картины на избранный штрих. Впрочем эту погрешность мы уже учли не прямо, а косвенно, введя в вычисления ошибку фокусировки пожа, согласно выражению (128).

Сделаем следующий вывод. Теневой метод (щели и пожа или щели и нити), при условии хорошего теневого прибора, опытного экспериментатора и достаточно плавной формы поверхности зеркала, обладает все же недостаточной точностью для количественных исследований формы первоклассного зеркала, подобно-го нашему.

Происходит это отчасти потому, что теневой прибор измеряет продольные перемещения с меньшей точностью, чем теневой метод позволяет осуществить фокусировку пожа или нити в случае достаточно больших апертур пучка. Поэтому описанная количественная форма теневого метода удовлетворительна для испытания длиннофокусных зеркал и непригодна для испытания зеркал светосильных. Зеркало нашего случая (угловая апертура 1:5) может рассматриваться скорее как короткофокусное, чем как длиннофокусное.

Неудивительно поэтому, что многие авторитеты считают теневой метод только качественным и даже обрекают на неудачу попытки превратить теневой метод в количественный, что, конечно, неправильно. Даже в нашем случае, если бы мы имели теневой прибор с более точным отсчетом продольных перемещений суппорта, например  $\pm 1$  мкм и если бы мы могли измерять  $y$  с точностью  $\pm 0,5$  мм, что нетрудно, — числа таблицы 23 изменились бы резко образом в лучшую сторону.

Не приводя новой таблицы погрешностей, укажу, что в этом случае мы имели бы:

$$\Delta\delta_e \approx 0,13 \text{ мкм}, \quad (153)$$

что в 1,4 раза лучше ранее найденного значения. Будем также помнить, что истинные ошибки  $\Delta\delta_e$  всегда меньше максимальных, определяемых нами из табл. 23 или рис. 92.

Далее, при переходе от метода щели и пожа к методу щели и нити создаются более благоприятные условия для фокусировки нити на центр кривизны избранной зоны, а потому при определении погрешности фокусировки нити можно пользоваться не выражением (128), а другим, более близким к выражению (127), что резко снижает величину  $\Delta\delta_e$  при равенстве прочих условий.

Наконец, погрешность  $\Delta(\Delta y)$  никогда не будет входить во всех случаях с одним и тем же знаком, так как в этом случае,

при суммировании  $\Delta u$ , для внешней зоны (с) получилось бы  $\Sigma \Delta u$ , заметно отличающееся от 98 мм, и мы бы это сейчас же заметили и ввели соответствующие изменения в строку 5 табл. 22.

Короче говоря, я хочу сказать, что нельзя обречь на неудачу попытки применить тепловой метод в описанной выше количественной форме, но нужно пытаться производить дальнейшие усовершенствования теневой методики и тепловой аппаратуры и анализировать, в каких случаях стоит применять такую форму теплового метода, а в каких не стоит.

Мой «новый количественный тепловой метод», о котором ранее упоминалось, но который здесь не рассматривается, является хорошим доказательством возможности находить неожиданные решения задачи.

Все изложенные ранее трудности сами собой исчезают, как только мы решим применить тепловой метод не в количественной, а в качественной форме.

Уже было сказано, что от опытного наблюдателя и при хорошем теневом приборе не укроются ошибки сферического зеркала, измеряемые малыми долями мкм. Так, в лучшем случае удастся уловить ошибку поверхности сферического зеркала, глубина или высота которой порядка  $\frac{1}{200}$  мкм; ошибку же в  $\frac{1}{40}$  мкм без труда улавливает малоопытный наблюдатель и при посредственном теневом приборе. Если предельная чувствительность теплового метода известна наблюдателю (мастеру или контролеру) и если он при испытании зеркала едва улавливает памеки на теневую картину (на отсутствие «плоского рельефа»), то поверхность зеркала является сферической с ошибками того же порядка, что и предельная чувствительность метода. Поэтому можно требовать от мастера такой полировки зеркала, после которой теневая картина зеркала представляется в виде плоского рельефа при чувствительности теплового метода несколько сниженной против максимальной, но все же достаточной для гарантирования первоклассного качества формы поверхности зеркала. Наконец, опытный наблюдатель, изучивший свойства своего теплового прибора и экспериментировавший с ним над зеркалами с точно измеренными ошибками, всегда может по теневой картине приблизительно оценить величину ошибок исследуемой поверхности.

Измерение радиуса кривизны пологого зеркала было достаточно подробно описано в предыдущей главе. В случае сферического зеркала с зональными ошибками может возникнуть вопрос: что считать радиусом кривизны такого зеркала? Можно дать два определения: первое совершенно точное определение — это радиус кривизны при вершине зеркала, т. е.  $R_0$ ; второе несколько произвольное определение — это средний радиус кривизны  $R_{ср}$ . Для измерения  $R_0$  мы фокусируем пучок теплового прибора так, чтобы наблюдать картину рис. 89, с, а затем описанным ранее способом производим необходимые измерения и вычисля-



ем  $R_0$ . Для измерения  $R_{ср}$  мы фокусируем нож так, чтобы в левой и в правой половинах теневой картины темные и светлые участки заняли бы приблизительно равновеликие площади, а затем измеряем обычным образом  $R_{ср}$ .

Точность измерения радиуса строго сферического зеркала нами уже выяснена в предыдущей главе. В случае зеркала с зональными ошибками точность измерения радиуса естественно снижается, как и произвольным становится само понятие о радиусе кривизны такой поверхности.

Итак, нам известна форма поверхности и радиус ее кривизны, однако только по одному лишь диаметру зеркала: по тому, на котором мы произвели разметку зоп и который был перпендикулярен к лезвию ножа или к длине нити и для которого чувствительность теневое метода максимальна.

Но по некоторому другому азимуту, например, перпендикулярному к данному, поверхность может иметь ту же самую форму, по другую кривизну. В случае отсутствия зональных ошибок зеркало может иметь различные кривизны по различным азимутам, причем будут в таком случае два направления, в одном из которых кривизна будет наибольшей, а в другом наименьшей.

Поякая торическая поверхность удовлетворяет последнему условию, а потому, если у зеркала получилась такая поверхность, ее можно рассматривать как сферическую с азимутальными ошибками. Такое зеркало неспособно построить на оси изображение точки в виде точки же, но обусловит так называемый «астигматизм на оси»\*).

Назовем направления максимальной и минимальной кривизны зеркала осями астигматизма. Если одна из этих осей параллельна лезвию ножа или нити, а другая им перпендикулярна, то не представляется возможности устранить астигматизма у пучка отраженных лучей и обнаружить по теневой картине различия кривизн зеркала по различным его азимутам. Но если лезвие ножа (или нить) составляет некоторый достаточный угол с осью астигматизма, то теневая картина приобретает специфический вид, по которому можно обнаружить, а затем и измерить наиболее чувствительным образом астигматизм пучка и различие кривизн зеркала по двум взаимноперпендикулярным диаметрам\*\*).

Обратимся к рис. 93, на котором вогнутое зеркало  $A$  имеет оси астигматизма  $SS$  и  $MM$ . В соответствии с этим астигматическое изображение точки имеет две взаимноперпендикулярные фокалы  $ss$  и  $mt$ . Лезвие ножа  $NN$  составляет угол, отличный от  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , с каждой из фокалей. Допустим для простоты рассуж-

\*) Последнего не следует смешивать с астигматизмом — aberrацией наклонных лучей.

\*\*) Этот метод был мною предложен и внедрен в практику в 1932 г. Книга «Amateur telescope making advanced» 1937, указывает, по-видимому, на более позднего автора (G. E. Warner) такого метода.

дения, что фокаль  $ss$  горизонтальна, а фокаль  $mt$  вертикальна, тогда как лезвие ножа  $NN$  составляет некоторый угол с горизонтом, близкий, по возможности, но не обязательно точно равный  $45^\circ$ . Установим лезвие ножа на оси зеркала и в плоскости фокали  $ss$ ; в этом случае мы будем наблюдать левую половину зеркала темной, а правую светлой (или наоборот, в зависимости от направления лезвия ножа), т. е. граница света и тени на теневой картине будет перпендикулярна фокали  $ss$ . Переведем лезвие ножа в плоскость фокали  $mt$ , и мы будем наблюдать верхнюю половину зеркала темной, а нижнюю светлой (или наоборот), т. е. и в этом случае граница света и тени на теневой картине перпендикулярна фокали  $mt$ . Делаем следующий весьма важный вывод: направления границы света и тени на теневых картинах взаимно перпендикулярны, когда нож из плоскости одной фокали перенесен в плоскость другой фокали.

Последовательности теневых картин изображены внизу рис. 93: когда нож находится к зеркалу значительно ближе фокали  $ss$ , направление границы света и тени (рис. 93, *a*) почти параллельно лезвию ножа (во всех случаях направление лезвия ножа указано прерывистой линией); переводим нож в плоскость фокали  $ss$  и получаем картину с вертикальной (в нашем случае) границей света и тени (рис. 93, *b*); далее, при удалении ножа от зеркала граница света и тени быстро поворачивается и располагается горизонтально (в нашем случае), когда нож находится в плоскости фокали  $mt$  (рис. 93, *d*); между этими двумя положениями ножа имеется такое, при котором граница света и тени перпендикулярна лезвию ножа (рис. 93, *c*), что совершенно уже необычно для нормального случая исследования поверхностей вращения; наконец, уводя нож за плоскость фокали  $mt$ , мы будем наблюдать все менее и менее быстрое вращение границы света и тени, приближающейся в пределе к направлению лезвия ножа (рис. 93, *e*).

Для измерения величины  $sm$  необходимо, следовательно, уловить два таких положения ножа, при которых направление границы света и тени изменяется быстрейшим образом на взаимно перпендикулярное, независимо от его наклона к горизонту или к лезвию ножа. Измерив соответствующее перемещение ножа, мы определяем величину  $sm$ . Чем меньше астигматизм, тем быстрее происходит поворот границы света и тени, и этим в

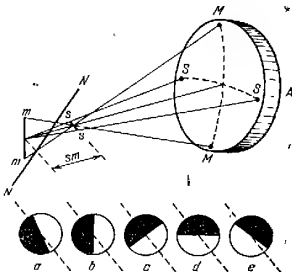


Рис. 93.

известной мере компенсируется снижением чувствительности из-за неровности самой границы в случае малой величины астигматизма.

Назовем максимальный и минимальный радиусы кривизны зеркала  $R_s$  и  $R_m$  и предположим, что  $R_s > R_m$ . Когда светящаяся точка и нож находятся в плоскости фокалии  $mm$ , т. е. в центре кривизны радиуса  $R_s$ , фокаль  $ss$  отстоит от фокалии  $mm$  на расстоянии:

$$sm = 2(R_s - R_m). \quad (154)$$

Начнем перемещать точку и нож вперед и сторону зеркала, желая сфокусировать нож на фокаль  $ss$ . Но в это время сама фокаль  $ss$  начнет перемещаться навстречу ножу с такой же скоростью и совпадает с ним, когда нож переместится только на половину отрезка  $sm$ . Таким образом, теневой прибор нашей конструкции измеряет не  $sm$ , а только половину  $sm$ , которую назовем  $s'm'$ :

$$s'm' = R_s - R_m, \quad (155)$$

т. е. разность наибольшего и наименьшего радиусов кривизны зеркала.

Если бы конструкция прибора была иной, и если бы перемещался только нож при неподвижной светящейся точке, мы бы измеряли отрезок  $sm$ , т. е. удвоенную разность экстремальных значений радиуса кривизны.

Измерив  $R_s - R_m$ , мы можем определить величину наибольшего астигматического отклонения  $\delta'_{\max}$  торической поверхности от ближайшей сферы сравнения. Такой сферой сравнения будет, например, сфера радиуса  $R_s$  (либо сфера радиуса  $R_m$  — по нашему усмотрению); тогда  $\delta'_{\max}$  явится отклонением от этой сферы — сферы радиуса  $R_m$  на внешней зоне  $y = \frac{D}{2}$ , где  $D$  — диаметр зеркала. Очевидно, что

$$\delta'_{\max} = \frac{D^2}{8R_s R_m} (R_s - R_m) \approx \frac{D^2}{8R^2} (R_s - R_m), \quad (156)$$

где  $R$  — средний радиус кривизны зеркала или даже любой из двух ранее фигурировавших ( $R_s$  или  $R_m$ ), виду малости разности  $R_s - R_m$ .

В случае зеркала, имеющего одновременно и зональные ошибки и астигматизм на оси, мы поступаем следующим образом. Измеряем зональные ошибки по любому из диаметров зеркала; затем измеряем разность радиусов  $R_s - R_m$  (155) и наибольшее астигматическое отклонение  $\delta'_{\max}$  (156); строим кривую  $\delta_y = \varphi(y)$  подобную кривой рис. 91; строим такую же вторую кривую, но повернутую относительно первой так, что ее ординаты постепенно увеличиваются на:

$$\Delta\delta'_y = \delta'_{\max} \left( \frac{y}{H} \right)^2, \quad (157)$$

где  $H = \frac{D}{2}$  — радиус внешней зоны зеркала. На рис. 94 представлен примерный график формы поверхности некоторого зеркала с зональными ошибками и астигматизмом на осп. В таком зеркале к кривой  $\delta_y(I)$  приходится добавить астигматическое слагаемое  $\Delta\delta_y'$ , а потому отклонение поверхности зеркала от ближайшей сферы сравнения (оси абсцисс) выражается не кривой I, а кривой II. Если даже  $\delta_{\max}$  и  $\delta'_{\max}$  порознь меньше допуска  $\frac{\lambda}{8}$ , то может оказаться, что их сумма превышает допуск  $\frac{\lambda}{8}$ , а потому

зеркало, пердоклассное по зональным ошибкам и пердоклассное по астигматизму, может в действительности оказаться испердоклассным по двум видам ошибок, взятых одновременно, т. е. будет неудовлетворительным в работе. В крупных астрономических зеркалах астигматические ошибки часто в несколько раз превышают зональные ошибки: к таким зеркалам можно отнести известное мне по исследованию формы 1-метровое зеркало Гребба

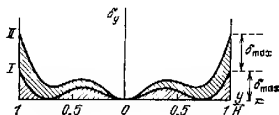


Рис. 94.

Симензского рефлектора и 1,8-метровое зеркало Канадского рефлектора: пользуясь материалами акад. Г. А. Шайпа и Пласскетта, я, в свое время, вычислил формы поверхностей этих зеркал и установил, что их астигматизм во много раз превышает их зональные ошибки, причем не только астигматизм, но и зональные ошибки в них достаточно велики, и зеркала значительно уходят за пределы зеркал первого класса точности; особенно это относится к канадскому зеркалу работы Брешпра.

Астигматизм стеклянных зеркал в основном объясняется немелкой шлифовкой и полировкой и неправильной разгрузкой зеркал во время их обработки на шлифовально-полировальной машине\*). Вряд ли можно объяснить астигматизм последующими деформациями стеклянных дисков; почему-то в наших зеркалах  $\varnothing \sim 850$  мм таких последующих деформаций не наблюдается. Если это так, то технология, методика контроля и оптическое искусство у Гребба и Брешпра стояли не на должной высоте.

Рис. 94 красноречиво говорит о вредном действии астигматизма: допуск Рэлея  $\frac{\lambda}{8}$  для ошибок одиночного пердоклассного зеркала должен быть разделен между зональными ошибками и ас-

\*) В ходе обработки зеркала на станке шлифовальник (или полировальник), перемещаясь по зеркалу, стремится сдвигать его и прижимать к боковым опорам Q (рис. 58) или b (рис. 36). Это приводит к появлению местных напряжений и может вызвать астигматизм зеркала на осп. Для исключения этого И. К. Павлов рекомендует окружать зеркало сплошным резиновым кольцом, заключенным в стальную обечайку. (Прим. ред.)

тигматизмом, а потому для каждой ошибки в отдельности приходится задавать еще более строгие допуски.

Местные ошибки поверхности можно характеризовать, как различие формы по различным азимутам. На рис. 95 представлена форма поверхности зеркала по некоторым трем, например, диаметрам. Крылья I, II, III могут быть несимметричными в левых и в правых половинах и пересекать одна другую. Ошибка

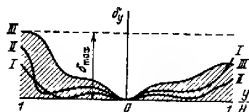


Рис. 95.

$\delta_{\max}$  определяется, как наивысшая точка заштрихованного на рисунке участка.

Местные ошибки могут получаться при работе с шлифовальными и полировальными инструментами по сравнению с изделием диаметра, при машинах со слишком медленным вращением,

особенно при сложной форме штриха, неравномерной подрезке полировальника и подсыхающем крокусе и, наконец, в момент стягивания полировальника с изделия при сильно подсохшем крокусе и плотно прильнувшем к стеклу полировальнике \*). В руках опытного мастера получается поверхность, как правило, свободная от местных ошибок, в пределах допуска Рэлея.

При исследовании сферических зеркал, как и при исследовании других оптических элементов и систем, в помощь тепловому методу можно привлечь метод окуляра, т. е. метод наблюдения изображения точки с помощью соответственно подобранного окуляра.

Заменяя в тепловом приборе щель точкой и включив позади ножки и несколько в стороне от него сильный окуляр, мы наблюдаем фокальные и внефокальные изображения точки; очевидно, что для наблюдения предфокальных изображений точки необходимо несколько переместить тепловой прибор вместе с точкой и окуляром от центра кривизны в сторону зеркала, а для наблюдения зафокальных изображений точки необходимо перемещать тепловой прибор за центр кривизны зеркала.

Чем меньше светящаяся точка, тем чувствительнее исследование. Чувствительность исследования особенно высока, когда точка имеет «дифракционный размер», т. е. когда ее диаметр того же порядка (и даже меньше), что и диаметр ( $2r$ ) дифракционного кружка:

$$2r = \frac{2.44\lambda R}{D}, \quad (158)$$

где  $R$  и  $D$  — радиус кривизны и диаметр исследуемого сферического зеркала. Так, при  $D = 200$  мм,  $R = 1000$  мм и  $\lambda = 0.555$  мкм диаметр «дифракционной» точки должен быть не более (а лучше менее) 6,8 мкм. При такой точке можно надеяться увидеть призм-

\*) Последний случай иллюстрирован в цитированной выше моей книге «Тепловые методы» на рис. 20.

наки дифракционной картины изображения, а при точках еще меньшего диаметра — почти классическую картину дифракционного изображения точки в случае идеального сферического зеркала.

Но чтобы глаз воспринял дифракционную картину изображения, необходим достаточно малый зрачок выхода ( $d$ ) окуляра. При больших зрачках выхода  $d$  неоднородности хрусталика и другие дефекты глаза совершенно не позволяют распознать тонкую структуру дифракционного изображения, которая выявляется при зрачках выхода, начиная от  $\sim 0,7$  мм и ниже.

Поэтому примем  $d = 0,7$  мм и определим фокусное расстояние  $f$  окуляра из простой зависимости:

$$f = \frac{dR}{D} = 0,7 \frac{R}{D} \text{ мм}, \quad (159)$$

где  $R$  и  $D$  — радиус кривизны и диаметр исследуемого зеркала.

Для нашего зеркала ( $R:D = 5$ ) следует взять окуляр с фокусным расстоянием  $f \leq 3,5$  мм. Если окуляр будет заметно слабее указанного (159), то не только исчезнут следы дифракционного изображения, но мы можем при окулярном испытании принять сферическую aberrацию глаза за зональные ошибки зеркала, астигматизм глаза — за астигматизм зеркала и неоднородности хрусталика — за местные ошибки поверхности зеркала.

В своей практике я всегда стремлюсь удовлетворить условию (159) или, во всяком случае, не отойти от него в сильной степени: в то же время я почти никогда не выдерживаю условия (158), применяя значительно более крупные точки, т. е. сознательно жертвуя чувствительностью окулярного испытания. На такую жертву я иду по целому ряду причин: во-первых, малые точки очень трудно осуществляют и легко засоряются; во-вторых, малая точка не позволяет перейти от окулярного испытания к тепловому, так как в этом случае тепловая картина будет слишком бледной; в-третьих, имея в резерве высокочувствительный тепловой метод, я смотрю на метод окуляра как на второстепенный и подсобный; в-четвертых, рассматривая отдельные пылинки и зазубринки на контурах крупной точки, а также наблюдая фокусировку контуров точки по различным азимутам, я могу и при крупной точке осуществить достаточно высокую чувствительность испытания.

Предфокальные, фокальные и зафокальные изображения достаточно малой (но не «дифракционной») точки изображены на рис. 96 для различных случаев ошибок поверхности зеркала.

Метод окуляра представляет практический интерес, главным образом, для задачи обнаружения астигматизма, хотя чувствительность метода окуляра заметно уступает чувствительности ранее описанного теплового метода обнаружения астигматизма; метод окуляра хорош уже тем, что от него не скроется достаточно большой астигматизм, как бы ни были ориентированы в пространстве оси астигматизма. Исключить астигматизм глаза при недо-

статочию сильным окуляре можно простым наклоном головы: если при изменении наклона головы оси эллиптических пятен астигматического впефокального изображения точки не изменяют наклона, значит астигматизм принадлежит зеркалу, а не глазу; если при этом на такой же угол поворачивается и ось эллиптического пятна, а соотношение большой и малой оси эллипса остается неизменным, значит зеркало свободно от астигматизма (во всяком случае значительного), а глаз наблюдателя астигматичен;

|                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Предфокальные</i>              |  |  |   |
| <i>Фокальные</i>                  |  |  |   |
| <i>Зафокальные</i>                |  |  |   |
| <i>Характеристики поверхности</i> | <i>Точная сфера</i>                                                               | <i>Значительный астигматизм</i>                                                   | <i>Малый астигматизм</i>                                                           |
| <i>Предфокальные</i>              |  |  |   |
| <i>Фокальные</i>                  |  |  |   |
| <i>Зафокальные</i>                |  |  |  |
| <i>Характеристика поверхности</i> | <i>Зональные ошибки</i>                                                           | <i>Местные ошибки</i>                                                             | <i>Все виды ошибок</i>                                                             |

Рис. 96.

наконец, при изменении формы эллипса и наклона его осей с наклоном головы астигматичны и зеркало и глаз. Применение достаточно сильных окуляров (159) парализует влияние астигматизма глаза на форму пятен изображений точки.

В случае применения теневого метода приходится поступать несколько сложнее: сперва наблюдать теневую картину, поль-

зуюсь вертикальным поком теневого прибора; нормальное направление движения тени не гарантирует еще отсутствия астигматизма у зеркала, так как одна из осей астигматизма может быть ориентирована параллельно лезвию ножа; поэтому следует повторить наблюдение, используя второй нож теневого прибора, ориентированный под углом  $45^\circ$  к горизонту. Если в обоих случаях тень движется нормально, т. е. в направлении, перпендикулярном лезвию соответственного ножа, то зеркало свободно от астигматизма; в противном случае по крайней мере один из двух ножей позволит нам обнаружить и измерить астигматизм, как это было пояснено ранее. Теневой метод имеет преимущество очень высокой чувствительности и полной объективности исследования астигматизма зеркала независимо от степени астигматизма глаза наблюдателя.

При таком исследовании обнаруживаются и местные ошибки зеркала при наблюдении, если не у обоих, то во всяком случае у одного из ножей.

2. Плоские зеркала. Плоскость небольшого размера проста в изготовлении, а ее исследование с помощью пробного стекла не представляет никаких трудностей. Можно даже сказать, что наиболее благоприятной для метода пробного стекла является плоская поверхность, для исследования которой в каждой оптической мастерской или лаборатории имеется плоское пробное стекло. При бесконечном разнообразии кривизны сферических поверхностей нулевой кривизны плоской поверхности ставит ее в привилегированное положение, и уж для такой единственной в своем роде поверхности у оптика имеется в наличии пробное стекло; в то же время для каждой сферической поверхности либо необходимо делать самому соответствующую пару пробных стекол, либо где-то ее доставать на время работы. Впрочем, мы уже видели, что теневой метод в этом случае даст очень удобный и выгодный выход из затруднительного положения.

Но когда размеры плоского астрономического зеркала достаточно велики ( $\varnothing > 200$  мм), не только трудно бывает найти готовое и, тем более, сделать пробное плоское стекло соответственного размера, но и самый метод пробы в этом случае теряет практический смысл по следующим трем основным причинам: 1) пробное стекло, паложненное на изделие, деформируется под действием собственного веса, хотя бы при этом изделие было вполне хорошо разгружено; в результате, наблюдаемые ошибки поверхности меньше истинных; 2) разогретая полировочкой поверхность изделия прикрывается стеклянкой пробой — скверным проводником тепла; в результате изделие, укутанное таким теплоизолятором, долго не принимает температуры окружающего воздуха и «время отстойки» значительно увеличивается, сильно замедляя работу; 3) при паложении крупной пробы на изделие почти неизбежны царапины. Для устранения первого дефекта метода и некоторого смягчения третьего, можно было бы и изделие и пробу подвешивать на ремнях и сближать их до необходимого контак-



та; но такой способ осложняет работу и не устраняет второго дефекта.

Наконец, изготовление большой плоской пробы для исследования большого плоского зеркала лишено логического и экономического смысла. Ведь если мы должны изготовить крупное плоское пробное стекло, то, очевидно, мы имеем в распоряжении какой-то метод для исследования его формы; так не проще ли применить этот метод к самому плоскому зеркалу и отказаться от изготовления пробы? Такой путь, конечно, является вполне логичным и наиболее экономичным. Кроме того, всякий контрольный метод позволяет исследовать поверхность с некоторой предельной точностью, и если мы применяем данный метод непосредственно к исследованию изделия, то поверхность изделия нам известна с точностью, равной точности метода; но если сперва мы применим некоторый метод к исследованию пробного стекла, а затем метод пробного стекла к исследованию изделия, то общая ошибка исследования равна сумме ошибок двух примененных методов исследования.

Для исследования плоскостей мы применим метод наклонных пучков; для повышения его чувствительности мы применим теневой метод фокусировки в методе наклонных пучков; наконец, для осуществления гомоцентрического пучка в методе наклонных пучков мы применим схему исследования Коммона, в которой расходящийся от точки пучок лучей трансформируется в сходящийся к точке пучок лучей с помощью вогнутого сферического зеркала.

На рис. 97 представлена схема Коммона для исследования плоскостей. Здесь  $S$  — светящаяся точка теневого прибора,  $A$  — испытываемая плоскость, наклоненная на угол  $\omega$  к оси падающего

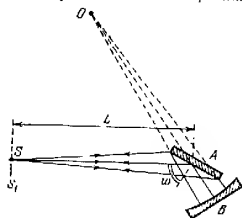


Рис. 97.

пучка; отраженный расходящийся пучок падает на вспомогательное вогнутое сферическое зеркало  $B$ , центр кривизны которого совпадает с изображением точки  $S$  в зеркале  $A$ ; поэтому отраженный от зеркала пучок лучей возвращается в точку  $S_1$  — лезвие ножа теневого прибора по направлениям лучей падающего пучка.

Радиус кривизны  $R$  зеркала  $B$  принципиально безразличен, так как точки  $SS_1$  можно как угодно перемещать в пространстве,

чтобы добиться их совпадения с центром кривизны  $O$  зеркала  $B$ , отнесенным вбок в  $SS_1$  плоскостью  $A$ . Из соображений же практических можно рекомендовать придерживаться для зеркала  $B$  отношения  $D : R = 1 : 7 - 1 : 12$ , где  $D$  — диаметр зеркала  $B$ .

Форма поверхности зеркала  $B$  желательна уже не периклассная, а, если так можно выразиться, сверхпериклассная, т. е.

ошибки зеркала  $B$  должны быть в 3—4 раза меньше допуска Рэлея. Вогнутая сферическая форма поверхности при произвольном значении радиуса ее кривизны позволяет легко осуществить зеркало  $B$  и весьма точно его исследовать с помощью теневых методов: как мы помним, чувствительность теневого метода исключительно высока в случае исследования вогнутых сферических поверхностей, а мастеру, которому приходится следить только за формой поверхности, но не за ее кривизной, удастся без особого труда выполнить вспомогательное зеркало с точностью до  $\sim 0,02$  мкм, даже при значительном диаметре этого зеркала. Следует помнить, что такое зеркало, подобно плоской пробе, изготовляется не только для случая исследования данного зеркала  $A$ , но и для исследования всевозможных плоскостей, диаметр которых не слишком превышает диаметр зеркала  $B$ .

В случае плоской формы поверхности зеркала  $A$ , теневая картина на пробке  $S_1$  будет совершенно такой же, как бы зеркала  $A$  не было, а  $S$  и  $S_1$  находились в центре кривизны  $O$  зеркала  $B$  \*). В случае зональных или местных ошибок зеркала  $A$  мы будем наблюдать характерную теневую картину зональных или местных ошибок в соответственной проекции, так как зеркало  $A$  наклонено на угол  $w$  и его контуры усматриваются из точки  $S_1$  не в виде круга, а в виде эллипса. Так как свет отражается от зеркала  $A$  дважды, то ошибки зеркала  $A$  дважды деформируют фронт волны и будут нами усмотрены на теневой картине в подчеркнутом виде. В зависимости от величины угла  $w$  эта подчеркнутость будет большей или меньшей, так как, согласно выражению (4), выигрыш в чувствительности будет не двойной, а в  $2 \cos w$  раза; при  $w \sim 45^\circ$  выигрыш в чувствительности, благодаря двукратному отражению света, хотя и при наклонном падении лучей, будет равен  $\sim 1,4$ .

Теневой метод, да еще в условиях повышенной чувствительности, легко позволяет обнаружить ошибки в 0,02 мкм (и даже еще меньшие), а опытный мастер без особых затруднений осуществляет сферическую поверхность с таким допуском.

Но плоское зеркало  $A$ , кроме того, должно иметь «нулевую кривизну» ( $R = \infty$ ). Как мы уже видели, при конечном значении  $R$  и при отличном от нуля  $w$ , наклонный пучок, отраженный от такой поверхности, приобретает астигматизм, измерение которого вполне доступно для схемы Коммона; зная же астигматизм и угол наклона  $w$ , мы однозначно определяем радиус кривизны ( $R$ ) и кривизну  $\left(\frac{1}{R}\right)$  зеркала  $A$ .

\*) Польстер (Polster H. D.—Appl Opt., 1970, v. 9, № 4, p. 840) обратил внимание на то, что метод Коммона может показать отсутствие общей кривизны испытуемого зеркала  $A$ , если последнее является частью внеосевого гиперболоида, а точки  $O$  и  $S$  — два его сопряженных фокуса. Для полной уверенности в плоскостности зеркала  $A$  испытания надо вести в двух положениях, поворачивая зеркало  $A$  на  $90^\circ$  вокруг его нормали. (Прим. ред.)

Предположим (см. рис. 97), что зеркало  $A$  расположено вблизи зеркала  $B$ ; назовем  $L$  — расстояние от теневого прибора до середины зеркала  $A$ ; будем помнить, что  $L$  в нашем случае исчезающе мало по сравнению с  $R$  квази-плоского зеркала, после чего выражение (142) для астигматической разности при однократном отражении гомоцентрического пучка примет вид \*)

$$\Delta_{sm} = \frac{2L^2 \sin w \operatorname{tg} w}{R}. \quad (160)$$

При двухкратном отражении пучка от квази-плоского зеркала в схеме Коммона произойдет удвоение астигматической разности, которую мы назовем  $sm$ :

$$sm = 2\Delta_{sm} = \frac{4L^2 \sin w \operatorname{tg} w}{R}. \quad (161)$$

Как мы помним, теневой прибор нашей конструкции (точка и нож перемещаются как одно целое) измеряет половину этой величины, т. е. величину  $\Delta_{sm}$  (160). Для измерения же величины  $\Delta_{sm}$  мы используем второй нож теневого прибора, наклоненный к горизонту на угол  $45^\circ$ , так как оси астигматизма в схеме Коммона при вертикально подвешенных зеркалах  $A$  и  $B$  имеют ориентировку: для одной оси — горизонтальную, для другой — вертикальную.

Измерив  $\Delta_{sm}$ , находим кривизну или радиус кривизны зеркала  $A$ :

$$R = \frac{2L^2 \sin w \operatorname{tg} w}{\Delta_{sm}}. \quad (162)$$

Зная, кроме того,  $D$  — диаметр зеркала  $A$ , определяем  $x$  — стрелку кривизны зеркала:

$$x = \Delta_{sm} \frac{D^2}{16L^2 \sin w \operatorname{tg} w}. \quad (163)$$

Если мы хотим, чтобы  $x$  не превышало  $\frac{\lambda}{8}$  (при  $\lambda = 0,555$  мкм), то допуску

$$(\Delta_{sm})_{\max} = 1,1 \cdot \frac{L^2 \sin w \operatorname{tg} w}{D^2} \text{ (микрометров)}. \quad (164)$$

Например, плоское зеркало  $A$  имеет диаметр  $D = 1000$  мм; при исследовании в схеме Коммона  $L = 10\,000$  мм и  $w = 45^\circ$ , тогда:

$$(\Delta_{sm})_{\max} \sim 0,08 \text{ мм},$$

а такую астигматическую разность удастся без особого труда обнаружить и измерить с достаточной точностью. Предполагается,

\*) См. Максугое Д. Д. *Астрономическая оптика*. — Л.: Наука, 1979, с. 369. (Прим. ред.)

конечно, что сферическое зеркало *B* свободно от астигматической ошибки с высокой точностью.

Наибольшая из наших первоклассных плоскостей, изготовленных под контролем теневого метода в схеме Коммона, имеет  $D = 850$  мм, а в ближайшие годы нам предстоит изготовление значительно более крупных зеркал. По мы применяем исследование плоскостей в схеме Коммона не только при крупных их диаметрах, но и при средних и малых, предпочитая даже в последнем случае метод Коммона методу плоской пробы.

Метод Коммона в сочетании с теневым методом весьма удачен.

Исключительно трудная проблема первоклассных плоскостей среднего и крупного размера впервые получила хорошее разрешение в результате изобретенной Коммоном схемы исследования \*). Заметим, что Фуко, за 30 лет до Коммона, был близок к решению той же проблемы и отлично чувствовал продуктивность метода наклонных пучков, только не смог предложить практически выгодной схемы для исследования крупных плоскостей, как то сделал Коммон.

---

\*) *Common A. A.*— *Month. Not.*, 1888, v. 48, p. 105.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Исследование вогнутых песферических поверхностей может быть осуществлено с помощью теневого метода в той же количественной форме и в той же схеме (см. рис. 87, 88, 89, 90), что и исследование вогнутых сферических зеркал. Измерив на теновом приборе величины  $\Delta R_u$  для различных зон  $u$ , мы определяем согласно (150) и (152) отклонение формы поверхности от сферы, т. е. узнаем геометрическую форму поверхности. Точность такого исследования, как мы помним, не всегда достаточна для испытания первоклассных зеркал. Этот метод не во всех случаях может удовлетворить требовательного исследователя, а потому желательно придумать и применить какой-то другой более совершенный метод к данному случаю исследования.

Исследование выпуклых песферических поверхностей оказывается задачей еще более трудной, так как их нельзя исследовать без посредства некоторых вспомогательных оптических элементов. На наше счастье выпуклые песферические зеркала в астрономических инструментах имеют относительно малые размеры, а потому и вспомогательная оптика, необходимая для их исследования, также не будет чрезмерно крупной. Для исследования выпуклого зеркала, вообще, необходимо осуществить такую схему исследования, в которой на испытываемое зеркало падает сходящийся пучок лучей значительной сходимости.

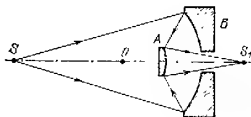


Рис. 98.

Имея в своем распоряжении достаточно крупное и светосильное сферическое зеркало  $B$ , мы всегда можем осуществить такое исследование выпуклого зеркала  $A$ , меньшего чем  $B$  размера.

На рис. 98 представлена первая из возможных схем. Здесь вогнутое сферическое зеркало  $B$  имеет центр кривизны в точке  $O$ ; светящаяся точка  $S$  располагается вне центра кривизны  $O$ , а потому от зеркала  $B$  отражается сходящийся пучок, обладающий значительной сферической абберацией. Этот пучок падает на выпуклое зеркало  $A$  и после отражения от него и прохождения через дыру в зеркале  $B$  дает в  $S_1$  изображение точки  $S$ , искаженное суммой аббераций зеркал  $B + A$ .

Зная геометрические характеристики схемы, всегда можно вычислить каждую из этих аббераций и их сумму, а затем изме-

ритель. истинные aberrации схемы, сравнить их с расчетными и отсюда вычислить отклонения истинной поверхности зеркала  $A$  от расчетной. Как видим, метод исследования очень сложный, приводящий к значительным aberrациям в точке  $S_1$  и требующий весьма строгого соблюдения расчетных положений обоих зеркал и точек  $S$  и  $S_1$ .

То же исследование можно осуществить и по схеме рис. 99, на котором отраженный от зеркала  $B$  пучок лучей направляется приблизительно по нормальям зеркала  $A$ , а потому  $S_1$  — изображение точки  $S$  — образуется вблизи самой точки  $S$  и оказывается сильно искаженным суммой сферических aberrаций зеркал  $B + A + B$ . В этой полой схеме исследовании aberrация зеркала  $A$  имеет некоторое покое значение, но может быть также вычислена, если известна расчетная форма поверхности зеркала  $A$  и его положение относительно сходящегося пучка (негомоцентрического). Вторая схема принципиально мало чем отличается от первой и таким же образом не всегда обеспечивает необходимую точность исследования. Она имеет по сравнению с первой лишь то преимущество, что в ней можно точно измерить расстояние от  $S$  до вершины зеркала  $B$ , а затем двигать зеркало  $A$  вдоль оси до тех пор, пока изображение  $S_1$  для некоторой зоны схемы не совпадает с  $S$ . В первой же схеме требовалось, во-первых, точно установить точку  $S$  относительно зеркала  $B$ , а затем передвигать вдоль оси зеркало  $A$ , пока расстояние от  $A$  до  $S_1$  (для некоторой зоны схемы) не приобретет расчетного значения.

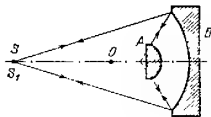


Рис. 99.

Сама собой напрашивается мысль, — нельзя ли осуществить такую схему исследования, чтобы изображение точки в  $S_1$  было отягчено возможно меньшими aberrациями, и чтобы в момент приобретения зеркалом  $A$  расчетной формы его поверхности aberrации в точке  $S_1$  обратились в нуль? Ведь в этом случае мы бы наблюдали плоский тепевой рельеф и смогли бы применить тепевой метод в его наиболее чувствительной качественной форме!

Что это в некоторых случаях возможно, мы сейчас покажем на рис. 99. Действительно, если точка  $S$  лежит за центром кривизны  $O$  сферического зеркала  $B$ , то отраженный от  $B$  пучок лучей обладает такой сферической aberrацией, при которой фокусы для внешних зон располагаются ближе к зеркалу  $B$ , чем фокус параксимальной области, и в первом приближении продольная сферическая aberrация пропорциональна квадрату зоны ( $y^2$ ). Если такому же условно будет удовлетворять расположение нормалей к поверхности зеркала  $A$ , то каждый из отраженных зеркалом  $B$  лучей совпадет с соответствующей нормалью зеркала  $A$ , а отраженный от зеркала  $A$  пучок лучей совместится с падающим: в точке  $S_1$  получится безaberrационное изображение

точки  $S$ . Поверхность, удовлетворяющая этому условию, носит название сплюснутого сфероида; у сплюснутого сфероида нормали пересекаются тем ближе к его вершине, чем больше квадрат зоны сплюснутого сфероида. Схема (рис. 99) является, таким образом, пригодной для исследования выпуклых сплюснутых сфероидов при наименьшей чувствительности теневого метода в его качественной форме, когда отсутствие теневого рельефа говорит о достижении у изделия заданной геометрической формы.

В этом случае аберрации зеркала  $B$  компенсировали аберрации зеркала  $A$ , и схема из двух аберрационных элементов  $A$  и  $B$  оказалась безаберрационной.

Так, мы пришли к выводу о принципиальной возможности осуществления компенсационных схем исследования и о их значительных практических преимуществах. Перед нами раскрываются двери в область компенсационных схем и методов исследования, и мы стараемся в дальнейшем извлечь отсюда возможно больше практической пользы. Но возвратимся к систематическому изложению вопроса об исследовании несферических поверхностей.

Среди бесконечного разнообразия уравнений форм несферических поверхностей особое место занимают поверхности второго порядка, т. е. поверхности вращения конических сечений: эллипса, параболы и гиперболы.

Достаточно сказать, что при изготовлении зеркальных телескопов используют для поверхностей зеркал именно эти, а не какие-нибудь другие поверхности вращения.

Вращая эллипс вокруг большой оси, мы получаем эллипсоид вращения; вращая его вокруг малой оси, мы получаем сплюснутый сфероид; вращение параболы или гиперболы вокруг их осей соответственно дает поверхности, называемые параболоидом вращения и гиперболоидом вращения. Ради краткости соответственные зеркала называют: эллиптическими, сплюснуто-сферическими, параболическими и гиперболическими. Как те, так и другие могут быть выпуклыми и вогнутыми.

Каждая такая поверхность может быть однозначно определена двумя характеристиками:  $R_0$  (или  $\hat{R}$ ) — радиусом кривизны при вершине и  $e^2$  — квадратом эксцентриситета соответственного конического сечения; при этом:

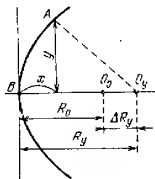
$$\left. \begin{array}{ll} \text{Для сплюснутых сфероидов} & \dots \dots \dots e^2 < 0 \\ \text{Для сфер} & \dots \dots \dots e^2 = 0 \\ \text{Для эллипсоидов} & \dots \dots \dots 0 < e^2 < 1 \\ \text{Для параболоидов} & \dots \dots \dots e^2 = 1 \\ \text{Для гиперболоидов} & \dots \dots \dots e^2 > 1 \end{array} \right\} \quad (165)$$

Все конические сечения могут быть заданы общим уравнением

$$y^2 = 2R_0x - x^2(1 - e^2) \text{ или } x = \frac{R_0 - \sqrt{R_0^2 - y^2(1 - e^2)}}{1 - e^2}, \quad (166)$$

где  $x$  и  $y$  — координаты кривой для случая, когда начало координат совмещено с вершиной кривой, а ось  $X$ -ов является осью вращения для поверхности.

Изобразим на рис. 100 часть такой поверхности в виде кривой конического сечения, вращение которой вокруг оси абсцисс образовало данную поверхность. Точка  $B$  — вершина поверхности; радиус кривизны при вершине назовем  $R_0$ ; соответственно  $O_0$  является центром кривизны для параксимальной области поверхности. Для некоторой точки  $A$  с координатами  $x$  и  $y$  (166) строим нормаль  $AO_y$ , которая пересекает ось абсцисс в точке  $O_y$ . Отрезок  $BO_y$  назовем  $R_y$ , и будем помнить, что  $R_y$  — не радиус кривизны зоны  $y$ , а абсцисса точки пересечения нормали зоны  $y$  с осью  $X$ . Укажем на следующее замечательное свойство конических сечений:



$$\Delta R_y = R_y - R_0 = xe^2. \quad (167)$$

Рис. 100.

Так, в случае сферы ( $e^2 = 0$ )  $\Delta R_y = 0$ , т. е. тривиальная истина, что нормали к сфере (ее радиусы) сходятся в общем центре  $O_0$ . Таким же образом в случае параболоида ( $e^2 = 1$ )  $\Delta R_y = x$ , т. е. нормали зон  $y$ , пересекаются за центром кривизны параксимальной области на расстояниях, равных соответственным стрелкам  $x$ ; параболоида, и т. д. в соответствии со следующей схемой:

|                                    |                      |   |       |
|------------------------------------|----------------------|---|-------|
| Для сплюснутых сфероидов . . . . . | $\Delta R_y < 0$     | } | (168) |
| Для сфер . . . . .                 | $\Delta R_y = 0$     |   |       |
| Для эллипсоидов . . . . .          | $0 < \Delta R_y < x$ |   |       |
| Для параболоидов . . . . .         | $\Delta R_y = x$     |   |       |
| Для гиперболоидов . . . . .        | $\Delta R_y > x$     |   |       |

У каждой из этих поверхностей, за исключением сплюснутых сфероидов, имеются две анаберрационные точки и соответственно два анаберрационных сопряженных расстояния  $s$  и  $s'$ ; иными словами, поместив в одну из этих точек светящуюся точку, мы получим в другой точке ее безаберрационное изображение; установив пож Фуко в этой второй точке, мы должны наблюдать плоский теневой рельеф в том случае, когда реальная поверхность зеркала не отличается от теоретической (расчетной) поверхности второго порядка.

Для сферы обе анаберрационные точки, очевидно, совпадают с ее центром кривизны. Для эллипсоида такими точками будут его фокусы. Для параболоида одной анаберрационной точкой является фокус, тогда как другая лежит в бесконечности. Наконец, для гиперболоида анаберрационными точками являются его фокусы, из которых один лежит по одну сторону поверхности, а другой по другую.



Подобно тому, как мы исследовали сферу из центра кривизны, попробуем осуществить исследование некоторых несферических поверхностей второго порядка, располагая светящуюся точку в одном из фокусов, а нож Фуко в другом.

**Вогнутое эллиптическое зеркало** (рис. 101). Пусть  $S$  и  $S'$  — фокусы эллипсоида  $ABC$ , лежащие соответственно на расстоянии  $s$  и  $s'$  от вершины  $B$ . Если в  $S$  поместить светящуюся точку или щель, то отраженный от зеркала луч, независимо от значения зоны  $y$ , приходит в точку  $S'$ , где мы расположим нож Фуко (или нить в случае метода щели и нити) и будем наблюдать картину отсутствия теневого рельефа. Ничтожные ошибки поверхности зеркала (порядка  $\frac{1}{200}$  мкм) могут быть нами обнаружены, так как теневой метод применяется в качественной его форме,

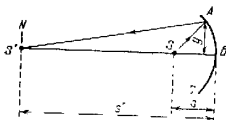


Рис. 101.

т. е. при наименьшей чувствительности. Оптик полирует зеркало до тех пор, пока не исчезнут следы теневого рельефа, и в этом случае зеркало  $ABC$  окажется эллипсоидом с фокусными отрезками  $s$  и  $s'$  и с той точностью, на которую способен теневой метод.

Отрезки  $s$  и  $s'$  связаны с эксцентриситетом  $e$  следующим уравнением:

$$e^2 = \frac{(s' - s)^2}{(s' + s)^2}. \quad (169)$$

Отрезок  $s'$  определяет собой длину испытательного помещения; согласно (169) он равен:

$$s' = s \frac{(1 + e)}{(1 - e)}. \quad (170)$$

Но для параксиальной области эллипсоида справедлива элементарная зависимость:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R_0}, \quad (171)$$

а потому:

$$s' = \frac{R_0}{1 - e}. \quad (172)$$

Длина испытательного помещения должна быть, по крайней мере, на 1 м больше  $s'$ , чтобы наблюдатель мог удобно расположиться с прибором позади точки  $S'$ .

На следующих частных примерах выясним обстановку исследования вогнутых эллипсоидов. Предположим, что задано изготовить такое зеркало с диаметром  $D = 500$  мм при  $R_0 = 2000$  мм и  $e^2 = 0,25$ . Определяем, что  $e = 0,5$ , после чего  $s' = 4000$  мм = 4 м, а длина испытательного помещения не менее 5 м. Предположим, что у того же зеркала  $e^2 = 0,75$ . Определяем, что  $e = 0,866$ , после чего  $s' = 15000$  мм = 15 м, а длина испытательного помещения не менее 16 м.

В первом случае ( $e^2 = 0,25$ ) форма поверхности зеркала приближалась к сферической и требовалось испытательное помещение умеренной длины. Во втором случае ( $e^2 = 0,75$ ) форма поверхности приближалась к параболической, и размеры испытательного помещения в несколько раз возросли.

Рассмотрим на тех же примерах еще одну сторону вопроса. Всякую несферическую поверхность тем труднее изготовить, чем больше ее отклонение от сферы, т. е. асферичности. Назовем  $\delta_{\max}^0$  — наибольшим отклонением поверхности от ближайшей сферы сравнения. Для поверхностей второго порядка, и в частности для рассматриваемых сейчас двух эллиптических зеркал \*)

$$\delta_{\max}^0 \approx \frac{D^4 e^2}{512 R_0^3} \quad (173)$$

В первом примере  $\delta_{\max}^0 \approx 3,7$  мкм, а во втором  $\delta_{\max}^0 \approx 11,2$  мкм; при асферичности в 3 раза большей ретушь поверхности окажется по в 3 раза, а во много раз более трудной; при некоторой же достаточно большой асферичности с задачей изготовления первоклассного зеркала не справятся даже наиболее искусные мастера.

Поэтому делаем заключение, что вогнутые эллипсоиды, сравнительно близкие к сфере (малое  $e^2$ ), удобно последуют в схеме рис. 101; они же сравнительно легки в изготовлении. Эллипсоиды же, близкие к параболю (  $e^2$  близко к единице) не только более трудны в изготовлении, но и требуют непомерно длинных помещений для своего испытания в схеме рис. 101.

Форма поверхности ( $e^2$ ) эллипсоида зависит, конечно, не от нас, а от условий задания; поэтому мы соглашаемся брать за осуществление таких зеркал в тех пределах, в которых наше искусство позволяет воспроизводить первоклассные поверхности с большой асферичностью. Но методика исследования эллипсоидов различных характеристик должна быть различной: для эллипсоидов с умеренным  $e^2$  вполне приемлема схема исследования рис. 101, тогда как для эллипсоидов с  $e^2$ , приближающимся к единице, необходима какая-то другая пока нами не рассмотренная методика испытания.

Допустим, что испытательное помещение в 16 м длины нас не пугает, как не пугает и асферичность 11,2 мкм, и что мы изготовили вогнутое зеркало  $D = 500$  мм,  $R_0 = 2000$  мм и  $e^2 = 0,75$ . Такое зеркало может оказаться очень полезным вспомогательным лабораторным зеркалом для следующих случаев исследований:

1. Поместив светящуюся точку в  $S'$  (рис. 101), мы получим ее безаберрационное изображение в точке  $S$ , причем угловая апертура ( $A$ ) пучка, сходящегося в точку  $S$ , будет равна

$$A = \frac{D}{s} = 1:2,14,$$

\*) См. *Максудов Д. Д. Астрономическая оптика*/2-е изд.—Л.: Наука, 1979, с. 182, формула (150). (Прим. ред.)

так как, согласно (171),  $s = 1070$  мм. Располагая между  $S$  и зеркалом  $ABC$  различные выпуклые сферические зеркала с отношением диаметра к радиусу кривизны не превышающим  $1:2,14$  так, что их центры кривизны совпадают с точкой  $S$ , мы получаем возможность исследовать выпуклые сферические зеркала качественным тепевым методом при положении светящейся точки и точки в  $S'$ .

Чем ближе радиус кривизны испытываемого выпуклого зеркала к величине отрезка  $s$ , тем большее будет экранирование пучка этим зеркалом и тем больший его центральный участок окажется неисследованным.

С таким экранированием часто можно мириться, так как во многих случаях зеркальных и зеркальнолинзовых систем центральные участки зеркал не участвуют в образовании изображения.

2. Сменяя светящуюся точку значительно влево или вправо от точки  $S'$ , мы будем вызывать соответственные незначительные смещения изображения вправо или влево от точки  $S$ , причем сходящийся пучок будет обладать в одном случае положительной и в другом случае отрицательной сферической аберрацией.

В первом случае имеется принципиальная возможность исследовать выпуклые поверхности, имеющие  $e^2 > 0$  (эллипсоиды, параболоиды, гиперболоиды), а во втором — поверхности, имеющие  $e^2 < 0$  (сплюснутые сфероиды). Очевидно, что эти поверхности следует располагать между зеркалом  $ABC$  и аберрационным фокусом отраженного сходящегося пучка так, чтобы лучи этого пучка совпадали с нормальными испытываемой поверхности. Так как аберрации зеркала  $ABC$  могут быть вычислены для любого положения светящейся точки на оси и так как расположение нормалей у заданной выпуклой поверхности второго порядка может быть определено, то описанная схема принципиально (но не всегда практически) пригодна для исследования различных по форме выпуклых поверхностей второго порядка.

**Вогнутое параболическое зеркало.** Параболические вогнутые зеркала до последнего времени имеют наибольшее распространение и применение в зеркальных телескопах, поэтому, до недавнего времени, их исследование представляло наиболее актуальную проблему для астрономической оптики.

В самое последнее время параболические зеркала начинают заменять либо гиперболическими, либо эллиптическими, так как апланатическая зеркальная система может быть осуществлена при посредстве зеркал той или другой формы, лишь бы форма главного зеркала не была параболической.

Но параболические зеркала существуют и долго еще будут существовать в обычных рефлекторах, а потому рассмотрим схемы для их исследования.

Применив то же рассуждение, что и для эллиптического зеркала, мы должны расположить светящуюся точку в фокусе параболоида, а точку Фуко отнести в бесконечность, либо наоборот.

Так как удалиться с ножом в бесконечность невозможно, то остается возможность перенести в бесконечность светящуюся точку.

Идеальными бесконечно удаленными точками являются звезды, а потому наилучшим, казалось бы, способом исследования вогнутого параболоида был бы способ исследования яо небесной звезде, когда на зеркало падает параллельный пучок, сходящийся после отражения точно в фокусе параболоида, где и следует установить нож Фуко для наблюдения теневой картины. Но звезды светят ночью, а оптики работают днем; звезды, перефразируя Козьму Пруткову, светят только в звездные ночи; звезды движутся и требуют соответственного движения испытываемого зеркала и ножа Фуко вместе с наблюдателем; наконец, что самое главное, атмосферные условия лишь очень редко бывают благоприятными для точных и чувствительных теневых исследований, тогда как в большую часть ясных звездных ночей мы будем наблюдать волнующуюся теневую картину атмосферной турбулентции, а не картину мелких ошибок поверхности зеркала. Если бы оптик пошел по такому, казалось бы, естественному пути при исследовании зеркала, то либо он невероятно длительно выполнял работу, либо изготовил в нормальные сроки весьма скверное зеркало.

Как контрольное, так, тем более, и рабочее испытание оптики должно производиться в пределах испытательного лабораторного помещения, в условиях постоянства температуры и отсутствия конвекционных потоков воздуха. А такое помещение будет иметь не только конечные, но и возможно ограниченные размеры.

Оставляя в стороне рассмотренный уже количественный метод теневое испытание по зонам из центра кривизны параксиальной области и не рассматривая пока компенсационного метода, можно указать на три возможных метода качественного испытания вогнутых параболоидов.

1. *Испытание вогнутого параболоида при значительном удалении светящейся точки.* Если нельзя отвести светящуюся точку в бесконечность, то можно удалить ее на весьма

значительное расстояние от испытываемого зеркала, посылая на него расходящийся пучок, достаточно близкий в параллельному.

На рис. 102 параболитическое зеркало  $ABC$  имеет своим фокусом точку  $F$  и фокусным расстоянием отрезок  $BF = f = \frac{R}{2}$ . Расположим светящуюся точку в  $S$  на расстоянии  $s$  от вершины зеркала и получим ее изображение в  $S'$  на расстоянии  $s'$  от верши-

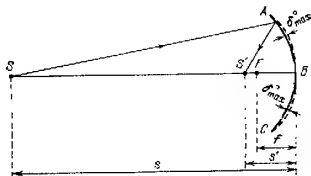


Рис. 102.

лы зеркала; согласно (171)  $s'$  должно несколько превышать  $f$ . В  $S'$  располагаем пож Фуко и наблюдаем теневую картину. Точку и пож можно обменять местами, если окажется более выгодным наблюдать теневую картину в  $S$ , а не в  $S'$ , где для этого требуется применение диагонального плоского зеркала.

Доблившись плоского теневого рельефа в схеме рис. 102, мастер в действительности получит не параболоид  $ABC$ , а весьма близкий к нему эллипсоид, показанный на рисунке прерывистой линией. Этот эллипсоид имеет фокусы в точках  $S$  и  $S'$  и отклоняется от параболоида на величину  $\delta_{\max}$ . Так как наибольшее взаимное отклонение двух поверхностей второго порядка, при условии, что одна из поверхностей является ближайшей поверхностью сравнения, равно:

$$\delta_{\max}^2 \approx \frac{D^4 (e_1^2 - e_2^2)}{512R_0^3}, \quad (174)$$

где  $e_1^2$  и  $e_2^2$  — квадраты эксцентриситетов этих поверхностей, то для случая параболического зеркала следует принять  $e_1^2 = 1$ , а  $e_2^2 = e^2$  считать квадратом эксцентриситета эллипсоида, изображенного на рисунке прерывистой линией.

Поэтому

$$\delta_{\max}^2 = \frac{D^4 (1 - e^2)}{512R_0^3} = \frac{DA^3 (1 - e^2)}{4096}, \quad (175)$$

где  $A = D : f$ , причем  $f = \frac{R_0}{2}$ .

Зная  $s$  и  $s'$ , определяем квадрат эксцентриситета эллипсоида по выражению (172):

$$e^2 = \left(1 - \frac{2f}{s}\right)^2. \quad (176)$$

Так как в нашей схеме  $2f \ll s$ , то

$$e^2 \approx 1 - \frac{4f}{s}, \quad (177)$$

после чего выражение (175) принимает вид:

$$\delta_{\max}^2 \approx \frac{D^2 A^2}{1024s}, \quad (178)$$

где  $s$  — более длинное фокусное расстояние эллипсоида. Приравняв (178) одной восьмой волны  $\left(\frac{\lambda}{8}\right)$  при  $\lambda = 0,555$  мкм, получаем:

$$s_{\min} = 14,0 D^2 A^2. \quad (179)$$

Составляем табл. 24 минимальных удалений ( $s_{\min}$ ) светящейся точки (или пожа) от параболоида, исследуемого данным методом.

Как видим, этот метод совершенно неприемлем для исследования крупных и светосильных зеркал; так, например, при  $D = 1000$  мм и  $A = 1:2,5$  потребовалось бы испытательное помещение длиной 2,2 км! Допустим, что мы решили бы производить исследование на открытом воздухе ночью и удалили бы искусственную звезду на 2,2 км от зеркала; в этом случае сильно турбулентный приземный слой атмосферы, конечно, не позволил бы

Таблица 24

$[s_{\min}$  (метрах)]

| $\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$ | 1:2,5 | 1:3,5 | 1:5 | 1:7 | 1:10 | 1:14 |
|--------------------------------------|-------|-------|-----|-----|------|------|
| 1000                                 | 2200  | 1100  | 560 | 290 | 140  | 71   |
| 700                                  | 1100  | 560   | 270 | 140 | 69   | 35   |
| 500                                  | 560   | 290   | 140 | 71  | 35   | 18   |
| 350                                  | 280   | 140   | 69  | 35  | 17   | 8,8  |
| 250                                  | 140   | 71    | 35  | 18  | 8,8  | —    |
| 200                                  | 90    | 46    | 22  | 11  | 5,6  | —    |
| 140                                  | 44    | 22    | 11  | 5,6 | —    | —    |
| 100                                  | 22    | 11    | 5,6 | —   | —    | —    |

произвести сколько-нибудь удовлетворительное по точности испытание. Но параболические зеркала умеренного диаметра и светосилы вполне успешно могут быть исследованы таким способом в сравнительно небольших помещениях.

В таблице отделены жирной границей практически возможные случаи испытания, когда длина испытательного помещения не превышает 50 м. Так, 10-дюймовое зеркало ( $D = 250$  мм) для любительского телескопа при относительном отверстии  $A = 1:7$  может быть испытано по данному способу в помещении, длина которого не превышает 20 м.

2. *Испытание вогнутого параболоида с помощью коллиматора.* Создадим параллельный пучок («искусственную бесконечность») с помощью коллиматора, поместив в его фокусе светящуюся точку (или щель) и направив параллельный пучок на испытуемое параболическое зеркало. Понятно, что линзового коллиматора, достаточно большого для исследования крупных зеркал, мы не изготовим: такой коллиматор был бы слишком дорог, а качество его могло бы оказаться низким из-за оптических дефектов стекла. Поэтому в качестве коллиматора могло бы служить очень хорошее параболическое зеркало такого же (или даже большего)

размера, что и испытуемое зеркало. Но, во-первых, изготовление параболлических зеркал достаточно сложно, а во-вторых, для контроля формы такого зеркала необходима какая-то рациональная схема исследования, которой мы пока не имеем. Поэтому, параболлическое зеркало коллиматора можно заменить достаточно длиннофокусным сферическим.

Если параболлическое зеркало должно быть выполнено с точностью  $\frac{\lambda}{8} = 0,07$  мкм, то вспомогательное сферическое зеркало, заменяющее в коллиматоре параболоид, должно отклоняться от параболоидальной формы на величину, значительно меньшую 0,07 мкм, например на 0,02 мкм; эту, несколько произвольную, но достаточно строгую величину мы и примем для дальнейших выводов.

Согласно (174) сфера отклоняется от ближайшего параболоида на величину

$$\delta_{\max}^0 = \frac{D^4}{512R^3}. \quad (180)$$

Приравняв эту величину 0,02 мкм, определяем минимальную длину радиуса кривизны такого сферического зеркала:

$$R_{\min} = 0,0046 D^3 \sqrt{D} \text{ (метров)}. \quad (181)$$

В табл. 25 приведены  $R_{\min}$  (в метрах) для коллиматоров со сферическими зеркалами различных диаметров  $D$  мм.

Т а б л и ц а 25

| $D$ , мм       | 200      | 300    | 500    | 1000   | 2000   |
|----------------|----------|--------|--------|--------|--------|
| $R_{\min}$ , м | 5,4      | 9,2    | 18,2   | 46     | 116    |
| $f$            | 2,7      | 4,6    | 9,1    | 23     | 58     |
| $A = D : f$    | 1 : 13,5 | 1 : 15 | 1 : 18 | 1 : 23 | 1 : 29 |

Даже для 1-метрового коллиматора радиус кривизны сферического зеркала меньше 50 м, а потому такое зеркало практически можно изготовить и исследовать теневым методом при достаточно длинном испытательном помещении.

В то же время 2-метрового зеркала, по-видимому, таким способом не изготовить, так как необходимая длина помещения в этом случае превышает 100 м.

В третьей строке таблицы даны значения  $f = \frac{R}{2}$ , определяющие положение светящейся точки в коллиматоре и вместе с тем характеризующие длину испытательного помещения, занятую

одним только коллиматором. В последней строке приведены относительные отверстия  $A = D : f$  сферических зеркал таблицы.

Схема исследования изображена на рис. 103. Здесь  $B$  — вспомогательное сферическое зеркало табл. 25. В его фокусе расположена светящаяся точка (или цель)  $S$ . Параллельный пучок отрадает на испытуемый параболоид  $A$  и образует изображение точки  $S$  в фокусе  $F$ . Диагональное плоское зеркало  $C$  переносит изображение в  $F_1$ , где и располагается наблюдатель позади ножа Фуко  $N$ .

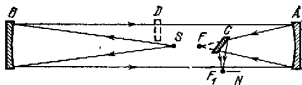


Рис. 103.

Фокусировка светящейся точки  $S$  относительно зеркала

$B$  производится с помощью плоского автоколлимационного зеркала  $D$  сравнительно небольшого размера.

Для этого теневой прибор сперва устанавливается своей точкой и ножом на оси зеркала  $B$  (установка блика на центр зеркала  $B$ ), а затем передвигается вдоль оси до тех пор, пока автоколлимационное изображение точки  $S$  не совпадает с ней самой или, вернее, пока оно не сфокусируется на ноже, лежащем в непосредственной близости от точки  $S$  и в общей с ней плоскости, перпендикулярной оси зеркала  $B$ . После достигнутой фокусировки убираем на пучка зеркало  $D$ , точку  $S$  вместе с теневым прибором оставляем в фокусе коллиматора и переходим в  $F_1$ , где применяем только нож  $N$ , смонтированный на суппорте. Более подробно о центрировке отдельных элементов схемы здесь говорить не будем. Скажем только, что она не слишком сложна.

В случае значительной светосилы зеркала  $A$  выгоднее светящуюся точку расположить не в  $S$ , а в  $F$ ; диагональное же зеркало  $C$  перенести в сходящийся пучок коллиматора, где и наблюдать теневую картину.

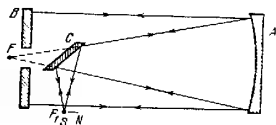


Рис. 104.

3. Испытание вогнутого парабооида в автоколлимационной схеме. Такой схемой особенно широко пользовался Ричи, поэтому она часто, ради краткости, называется схемой Ричи (рис. 104). Испытуемое параболическое зеркало  $A$  имеет своим фокусом точку  $F$ , отнесенную в  $F_1$  с помощью диагонального плоского зеркала  $C$ . Перпендикулярно оси зеркала  $A$  расположено автоколлимационное плоское зеркало  $B$ . Светящуюся точку  $S$  и нож Фуко  $N$ , иными словами, теневой прибор  $SN$ , следует расположить в точке  $F_1$ ; тогда после двукратного отражения от зеркал  $C$  и  $A$  и однократного отражения от зеркала  $B$  пучок снова соберется в  $F_1$ , где построит безаберрационное изображение светящейся точки в том случае, когда зеркала  $C$  и  $B$  — точные пло-



скости, а зеркало  $A$  — точный параболюид. Если в зеркале  $B$  предусмотрена центральная дыра, то теневой прибор  $SN$  располагается в фокусе  $F$ , и зеркало  $C$  оказывается излишним, что очень выгодно во многих отношениях.

Для осуществления высокочувствительного исследования необходимо исследовать с одного приема всю поверхность зеркала  $A$ , а не отдельно по частям. В таком случае диаметр зеркала  $B$  должен быть, по крайней мере, равен диаметру зеркала  $A$ , в действительности же на несколько сантиметров его превышать.

Как изготовить зеркало  $B$ , мы уже знаем. Для этого готовится большое вспомогательное вогнутое сферическое зеркало, с помощью которого в схеме Коммона исследуется вспомогательное плоское зеркало  $B$ .

Таким образом, при изготовлении большого параболического зеркала, превосходящего по своим размерам имеющиеся в нашем распоряжении готовые плоские зеркала, нам в действительности приходится выполнить три зеркальные поверхности: сферическую, плоскую, а затем уже требуемую параболическую. Все эти поверхности приблизительно одинакового диаметра.

Наиболее легким в изготовлении будет, конечно, сферическое зеркало, но трудно заранее сказать, какое из двух зеркал труднее в изготовлении, плоское или параболическое. При умеренной светосиле параболюида его легче изготовить, чем хорошую плоскость.

У одиночного параболического зеркала можно допустить ошибки формы поверхности, достигающие  $\frac{\lambda}{8}$ . Но так как мы исследуем это зеркало с помощью плоского, а это последнее было исследовано с помощью сферического, то ошибки формы сферического и плоского зеркал должны быть в несколько раз меньше  $\frac{\lambda}{8}$ . В свете этого рассуждения может оказаться, что изготовление не только плоского, но и сферического вспомогательного зеркала окажется более трудным, чем изготовление необходимого нам параболического зеркала, ради которого были изготовлены вспомогательные зеркала.

Поэтому, как ни заманчив на первый взгляд автоколлимационный метод, он обладает значительными недостатками экономического и оптического характера. К этим недостаткам следует еще добавить большие светопотери схемы. Допустим, что оба вспомогательных зеркала посеребрены или алюминированы; но параболическое зеркало во время рабочих исследований при его ретуши не может быть посеребрено или алюминировано, свет же отражается от него дважды, и при коэффициенте отражения стекла  $\sim 5\%$  яркость теневой картины снизится в  $\sim 400$  раз по сравнению с яркостью теневой картины непосредственно исследуемого объектива или вогнутого посеребренного зеркала.

Вогнутые гиперболюиды и сплюснутые сферопды. Если мы пока не нашли универсального хорошего метода для исследова-

ния вогнутых нараболоидов, то тем более мы не находим его для вогнутых гиперболоидов и сплюснутых сфероидов. Первые требуют для своего исследования сходящегося гомоцентрического пучка, т. е. несоразмерно больших вогнутых эллиптических вспомогательных зеркал для осуществления схемы рис. 105.

Здесь  $A$  — испытуемый гиперболоид с фокусами  $F$  и  $F'$ ;  $B$  — вспомогательное эллиптическое зеркало с фокусами  $S'$  и  $S$ ; фокус  $F$  совмещен с фокусом  $S'$ ; если в  $S$  находится светящаяся точка, то ее безабберационное изображение оказывается в  $F'$ , где и располагается порт Фоко. Из рисунка видна полная техническая и экономическая бессмыслица такой схемы исследования крупных гиперболоидов.

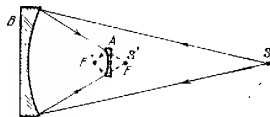


Рис. 105.

Сплюснутые сферонды не имеют анаберрационных точек, а потому к их исследованию вообще нельзя применить рассматриваемого нами метода, когда гомоцентрический пучок, сходящийся, параллельный или расходящийся, полученный тем или иным способом, направляется в одну из анаберрационных точек поверхности для того, чтобы образовать безабберационное изображение в другой анаберрационной точке.

Бегло рассмотрев схемы исследования выпуклых поверхностей и, более подробно, схемы исследования вогнутых поверхностей, так как в последних особенно заинтересована астрономическая оптика, мы пришли к выводу, что только вогнутые сферические поверхности и ограниченная область вогнутых эллипсоидов обеспечены высокочувствительным простым и удобным методом исследования из центра кривизны и из двух фокусов. Для остальных же поверхностей нам пока не удалось найти универсального и хорошего метода испытания.

Поэтому мы перейдем к заключительной части главы — к описанию компенсационной схемы исследований, выводящей нас из создавшегося тупика.

Компенсационная схема исследования вогнутых поверхностей второго порядка \*). Установим следующие рациональные положения.

1. Вспомогательное зеркало в схеме исследования должно обладать простейшей и наимыгоднейшей для изготовления и исследования формой поверхности. Иначе говоря, это зеркало должно быть вогнутым сферическим.
2. Диаметр вспомогательного зеркала должен быть существенно меньше диаметра испытуемого зеркала.
3. Отражение света от испытуемого зеркала должно быть однократное.

\*) Впервые доложена мною на заседании Одесского отделения общества любителей мироведения в сентябре 1924 г. См. Труды ГОИ, вып. 86, 1932, стр 94—118.

Изобразим на рис. 106 вогнутое сферическое зеркало  $ABC$  с центром кривизны в  $O$  и с радиусом кривизны  $r$ .

Расположим на оси  $OB$  светящуюся точку  $M$  на расстоянии  $s$  влево от вершины зеркала, причем  $2s < r$ . В этом случае изображение точки  $M$  окажется в  $M'_0$  — для параксиальной области и в  $M'_y$  — для зоны  $y$ .

Сопряженное расстояние  $s'_0$  и продольная абберация  $\Delta s'_y$  определяются в виде:

$$s'_0 = \frac{sr}{2s - r}, \quad \Delta s'_y = -y^2 \frac{(s - r)^2}{r(2s - r)^2}. \quad (182)$$

Так как в нашем случае  $r$  отрицательно, то сферическая абберация  $\Delta s'_y$  оказывается положительной и точки  $M'_0$ , как это и изображено на рисунке.

Запомним, что продольная абберация  $\Delta s'_y$  пропорциональна квадрату зоны  $y$ , зона же  $y$  приблизительно пропорциональна апертурному углу  $u'_y$ . Поэтому продольную абберацию можно выразить еще и следующим образом:

$$\Delta s'_y \approx k(u'_y)^2, \quad (183)$$

где  $k$  — некоторый коэффициент пропорциональности.

Теперь возвратимся к рис. 100 и выражениям (167) и (166), из которых видно, что

$$\Delta R_y = xe^2 \approx \frac{Y^2 e^2}{2R_0}, \quad (184)$$

т. е., что отступление точек пересечения нормалей  $Y$  от центра кривизны параксиальной области также пропорционально квадрату зоны, а вместе с тем и квадрату апертурного угла.

Так как у эллипсоидов, параболоидов и гиперболоидов  $e^2 > 0$ , то точки  $O_y$  рис. 100 лежат правее  $O_0$ , подобно тому, как точки  $M'_y$  рис. 106 лежат правее  $M'_0$ .

Оба эти свойства схемы рис. 106 позволяют осуществить компенсационную схему исследования вогнутых эллипсоидов, параболоидов и гиперболоидов, изображенную на рис. 107, левая часть которого повторяет рис. 100, а правая — рис. 106.

Здесь  $ABC$  — испытываемая поверхность вращения конического сечения с квадратом эксцентриситета  $e^2 > 0$ , т. е. эллипсоид, параболоид или гиперболоид с центром кривизны параксиальной области ( $Y=0$ ) в  $O_0$  и с соответственным радиусом кривизны  $R_0$ .

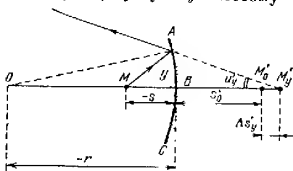


Рис. 106.

На расстоянии  $\Delta$  от зеркала  $ABC$  расположено вспомогательное вогнутое сферическое зеркало  $A'B'C'$  с центром кривизны в  $O'$  и с радиусом кривизны  $-r$ .

Выберем на оси некоторую точку  $M$ , удаленную от зеркала  $A'B'C'$  на расстояние  $-s$ , и находим сопряженное расстояние  $s'_0$  для зоны  $y=0$  и продольную абберацию  $\Delta s'_y$  для зоны  $y$ .

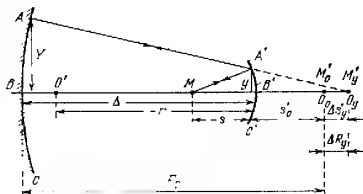


Рис. 107.

Наша задача сводится к тому, чтобы совместить точки  $M'_y$  с точками  $O_y$  для любых значений апертурных углов, т. е. добиться равенства отрезков  $\Delta s'_y$  и  $\Delta R'_y$  при любых апертурных углах схемы. В этом случае, поместив в  $M$  светящуюся точку и направив любой луч (например  $MA'$ ) на сферическое зеркало, мы будем иметь отраженный луч (например,  $A'A$ ) в точности совпадающим с нормалью испытываемого зеркала в точке падения луча (например в точке  $A$ ).

Решаем задачу в первом приближении, которое вполне удовлетворительно для зеркал умеренной светосилы и требует некоторых корректив в случае исследования светосильных зеркал.

Выписываем следующие зависимости:

$$s'_0 = \frac{r}{2 - \frac{r}{s}}, \quad (185)$$

$$\Delta s'_y \approx -y^2 \frac{\left(1 - \frac{r}{s}\right)^2}{r \left(2 - \frac{r}{s}\right)^2}, \quad (186)$$

$$\Delta R'_y \approx Y^2 \frac{e^2}{2R'_0}, \quad (187)$$

$$y \approx Y \frac{s'_0}{R'_0}. \quad (188)$$

Приравняв выражение (186) выражению (187) и произведя из двух других выражений необходимые подстановки, паходим:

$$R_0 e^2 \approx - \frac{2r \left(1 - \frac{r}{s}\right)^2}{\left(2 - \frac{r}{s}\right)^4} \quad (189)$$

или

$$r = - \frac{R_0 e^2 \left(2 - \frac{r}{s}\right)^4}{2 \left(1 - \frac{r}{s}\right)^2} = - k R_0 e^2, \quad (190)$$

где

$$k = \frac{\left(2 - \frac{r}{s}\right)^4}{2 \left(1 - \frac{r}{s}\right)^2}. \quad (191)$$

Для удобства пользования последними выражениями состав-  
ляем табл. 26 коэффициента  $k$  (191) для различных значений  $\frac{r}{s}$ , причем будем помнить, что во всех случаях должно быть  $\frac{r}{s} > 2$ .

Таблица 26

| $\frac{r}{s}$ | 2 | 2,2     | 2,4    | 2,6   | 2,8   | 3,0   | 3,3  | 3,6  | 4    | 5    |
|---------------|---|---------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| $k$           | 0 | 0,00056 | 0,0065 | 0,025 | 0,063 | 0,125 | 0,27 | 0,48 | 0,89 | 2,53 |

Так, например, мы хотим исследовать в компенсационной схе-  
ме рис. 107 вогнутое гиперболическое зеркало следующих харак-  
теристик:

$$D = 1000 \text{ мм}, \quad R_0 = 6000 \text{ мм}, \quad e^2 = +2. \quad (192)$$

Спрашивается, какое необходимо изготовить вогнутое сфери-  
ческое зеркало для осуществления компенсационной схемы? Не  
ограничив условий задачи, мы скажем согласно (109), что таких  
зеркал может быть бесчисленное множество. Введем следующее,  
например, ограничительное условие: расстояние между зеркала-  
ми:

$$\Delta = \frac{R_0}{2} = 3000 \text{ мм}, \quad (193)$$

а значит:

$$s'_0 = 3000 \text{ мм}, \quad (194)$$

после чего задача решается однозначно, так как на основании  
(185), (190) мы имеем:

$$s'_0 = \frac{R_0 e^2 \left(2 - \frac{r}{s}\right)^3}{2 \left(1 - \frac{r}{s}\right)^2}, \quad (195)$$

где все величины, кроме  $\frac{r}{s}$ , нам известны; поэтому решая кубическое уравнение, находим приближенно:

$$\frac{r}{s} \approx 3,44. \quad (196)$$

Подставляя последнюю величину в (185), определяем:

$$r \approx -4320 \text{ мм} \quad (197)$$

и согласно (196):

$$s \approx -1250 \text{ мм}. \quad (198)$$

Наконец, согласно (193) и (192), мы можем сказать, что  $D'$  — диаметр вспомогательного зеркала должен быть:

$$D' = 500 \text{ мм}. \quad (199)$$

Итак, для исследования гиперболоида (192) можно, например, применить следующее вогнутое сферическое зеркало для компенсационной схемы исследования:

$$D \geq 500 \text{ мм}, r \approx -4320 \text{ мм}, e_1^2 = 0, \quad (200)$$

$$s \approx -1250 \text{ мм}, \Delta \approx 3000 \text{ мм}.$$

Выполняем проверку, опять-таки приближенную.

Внешние зоны испытываемого и вспомогательного зеркала соответственно равны  $H = 250 \text{ мм}$  и  $H' = 125 \text{ мм}$ ; выражения (186) и (187) совместно с (200) дают для внешних зон следующие значения отрезков:

$$\Delta S_{H'}' \approx 10,4 \text{ мм}, \Delta R_H \approx 10,4 \text{ мм}, \quad (201)$$

т. е. они равны с точностью наших приближенных вычислений с помощью логарифмической линейки.

Показав принципиальную возможность осуществления весьма простой и удачной компенсационной схемы исследования вогнутых эллипсоидов, параболоидов и гиперболоидов, я умышленно воздержусь от дальнейшего ее развития и исследования, так как предполагаю через год-два написать специальную монографию о компенсационных схемах и методах \*).

Здесь же следует отметить, что вспомогательное зеркало удовлетворяет трем нашим условиям: 1) оно вогнутое и имеет сферическую форму поверхности, т. е. может быть элементарно просто изготовлено и исследовано с высшей точностью; 2) оно существенно меньше испытываемого зеркала; так, в произвольном рассмотренном выше случае  $D' \sim \frac{D}{2}$ , а это значит, что для вспомогательного зеркала требуется стеклянный диск, по крайней

\*) К сожалению, Д. Д. Максудов не осуществил свой замысел. Интересующихся подробнее трудами Д. Д. Максудова мы отсылаем к его работам, перечисленным в предисловии редакции и к работам его учеников — М. А. Соспиной и Паль Цзюньхуа (см. список литературы в начале книги). (Прим. ред.)

мере, в 8 раз меньшего объема и веса, чем для основного зеркала; 3) оно позволяет осуществить схему, при которой свет отражается от испытуемого зеркала однократно.

Это зеркало настолько проще и дешевле в изготовлении, чем основное зеркало, ради которого мы его готовим, что соображения экономического характера не могут нас остановить при применении компенсационного метода. Кроме того, вспомогательное сферическое зеркало, изготовленное для одного случая исследования, оказывается пригодным и для ряда других случаев исследований, т. е. для ряда зеркал с различными  $R_0$  и  $e^2$ ; для этого придется соответственно изложенной теории изменять величину отрезков  $\Delta$  и  $z$ .

Следует заметить, что отрезок  $\Delta$  необходимо измерять с точностью, вполне осуществимой на практике, после чего теневой прибор сам находит свое место в точке  $M$  рис. 107, и необходимости измерения отрезка  $z$  отпадает.

В заключение главы следует указать, что описанный метод вполне разрешает проблему исследования крупных астрономических зеркал, так как в апланатических и обычных зеркальных телескопах главное зеркало всегда только вогнутое и может иметь только одну из трех форм: либо эллиптическую, либо гиперболлическую, либо параболическую, а применительно к этим именно формам мы и рассматривали компенсационный метод схемы рис. 107.

Наконец, можно предложить читателю произвести сравнительный анализ компенсационного метода и метода автоколлимационного применительно к исследованию параболоидов. Этот анализ покажет огромные преимущества нашего метода и в отношении сроков изготовления, и в отношении стоимости стекла, абразивов, рабочих рук и электроэнергии, и в отношении точности изготовления как вспомогательного, так и основного зеркала, и в отношении яркости теневой картины, позволяющей применить теневой метод в более чувствительной форме с простейшими источниками света \*).

---

\*) Дальнейшее развитие компенсационного метода Д. Д. Максудова см. в его работе «Новая методика исследования формы зеркала крупных телескопов», опубликованной в Известиях ГАО АН СССР, 1957, № 180, с. 5. Эта статья является последней опубликованной им работой.

Р. Е. Гершберг и В. А. Темненко в статье «Оптимальная схема для контроля вогнутых несферических зеркал компенсационным методом Д. Д. Максудова» (Изв. КРАО, 1974, т. 52, с. 212) дали строгие аналитические формулы для компенсационных схем и показали, что степень компенсации зависит от выбора схемы. Полную компенсацию получать невозможно.

Кроме зеркальных компенсаторов в настоящее время применяются и линзовые компенсаторы (см. *Offner A.*; *Пурьев Д. Т.*; *Креопалова Г. В.* и *Пурьев Д. Т.* — в списке литературы в начале книги). (Прим. ред.)

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ ОПТИКИ

Каждая стеклянная заготовка, из которой в дальнейшем должна быть отшлифована линза объектива или призма спектрографа, подвергается достаточно сложному оптическому исследованию или контролю, преследующему несколько различных целей.

Прежде всего необходимо определить показатели преломления данной заготовки для нескольких рационально избранных значений длины волны  $\lambda$ .

Далее необходимо выяснить степень оптической однородности заготовки, т. е. произвести ее контроль на свдвиги и неоднородности, иными словами, установить степень постоянства найденного ранее значения показателя преломления на отдельных участках заготовки.

Так как неоднородности бывают косвенно связаны с напряжениями стекла, то желательно попутно произвести исследование натяжений. Значительные натяжения в стекле недопустимы еще и по той причине, что такое стекло во время обработки может легко дать трещины и разрушиться. Но следует заметить, что при наличии таких «опасных» напряжений в стекле, оно оказывается в сильнейшей степени оптически неоднородным, а потому бракуется в предыдущем исследовании по признаку оптической неоднородности. Вот почему исследование натяжений стекла мы примем, как желательное, но не будем считать его обязательным.

Далее, во многих случаях желательно, а в некоторых и необходимо точно знать светопоглощение стекла для различных длин волн. Особенно это относится к случаю стеклянных светофильтров, а также к случаю толстых призм и линз, от которых желательно иметь большое ультрафиолетовое пропускание.

Наконец, во многих случаях приходится более щепетильно подходить к таким, в общем безобидным, порокам стекла, как «пузыри», «камни» и «дымки». Эти пороки, если они не сопровождаются местными неоднородностями, не приводят к заметному снижению качества изображения; они в очень малой степени уменьшают светопропускание и лишь при значительном их количестве приводят к появлению заметной порции рассеянного света. Но нужно помнить, что в некоторых астрономических инструментах — например, в коронографах Лло — даже незначительное количество рассеянного света недопустимо или, во всяком случае, очень вредно.



Из всех этих исследований наиболее важными и обязательными почти во всех случаях изготовления крупной астрономической оптики являются первые два, т. е. измерение показателей преломления и исследование оптических неоднородностей. Об этих исследованиях мы и поговорим сейчас более подробно и применительно к практике изготовления крупной астрономической оптики.

**Измерение показателей преломления.** Показатели преломления стекла прежде всего зависят от его химического состава, т. е. от того, что именуется «сортом» оптического стекла. Но даже во вполне установившемся и строго обусловленном технологически сорте стекла его показатели преломления могут изменяться от плавки к плавке в некоторых пределах в связи с неизбежными ошибками при взвешивании составных частей шихты, в связи с некоторым различием температуры и продолжительности варки, когда более летучие компоненты шихты в большей или меньшей мере успевают улетучиться, и в связи с возможным различием режима отжига, также влияющего на показатели преломления стекла.

Как ни малы эти возможные отступления показателей преломления от средних, характерных для данного сорта, но в некоторых случаях ими нельзя пренебрегать, а потому мы вынуждены измерить показатели преломления данной заготовки, но довольствуясь уверенностью в сорте стекла. Да и полная уверенность в том, что данная заготовка является стеклом данного сорта, появляется у нас только после измерения ее показателей преломления.

Поясним сказанное на примере двухлинзового ахроматического апланатического объектива. Выполняя расчет объектива, мы предполагаем известными три показателя преломления, например,  $n_c$ ,  $n_d$  и  $n_r$ , как для кроновой, так и для флинтовой линзы. Исправив в объективе наилучшим образом сферическую aberrацию и кому и выполнив заданную ахроматизацию, например, визуальную, вычислитель указывает четыре радиуса кривизны, две толщины и воздушный промежуток между линзами, а оптик должен выдерживать эти конструктивные элементы с высокой точностью. Изготовленный объектив будет обладать заданным фокусным расстоянием и наилучшим образом исправленными сферической aberrацией, комой и хроматизмом. Но если истинные значения показателей преломления отличаются от расчетных, то истинное фокусное расстояние объектива будет отличаться от расчетного, сферическая aberrация и кома не будут наилучшим образом исправлены, а вершина хроматической кривой переместится из одного участка спектра в другой, т. е. нарушится заданная коррекция объектива.

Наиболее простым для анализа оказывается исследование влияния ошибки ( $\Delta n$ ) показателя преломления на изменение ( $\Delta f$ ) фокусного расстояния объектива. Такое исследование мы сейчас и выполним.

Введем следующие обозначения:

$n$  — средний показатель преломления;

$v = \frac{n-1}{n_F - n_C}$  — число Аббе;

$\Delta n$  — ошибка в определении  $n$ ;

$\Phi = 1 : f$  — оптическая сила линзы;

$c = \frac{\Phi}{(n-1)}$  — разность кривизн поверхностей линзы;

$\Phi = 1 : F$  — оптическая сила объектива.

(202)

Все эти величины, кроме последней, будем сопровождать одним штрихом (') для кроновой линзы и двумя штрихами (") для линзы флиптовой.

Оптическая сила бесконечно-тонкого объектива из двух соприкасающихся линз равна:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'' = (n' - 1)c' + (n'' - 1)c''. \quad (203)$$

По по условию наш объектив должен иметь визуальную коррекцию, а потому:

$$(n'_C - 1)c' + (n''_C - 1)c'' = (n'_F - 1)c' + (n''_F - 1)c'', \quad (204)$$

откуда:

$$\frac{c'}{c''} = - \frac{(n''_F - n''_C)}{(n'_F - n'_C)} \quad (205)$$

или, так как  $c = \frac{\Phi}{(n-1)}$ ,

$$\frac{\Phi'}{\Phi''} = - \frac{v'}{v''}. \quad (206)$$

Предположим, что показатель преломления флипта ( $n''$ ) известен нам с абсолютной точностью, тогда как показатель преломления кроны ( $n'$ ) известен с возможной ошибкой  $\Delta n'$ . В этом случае и оптическая сила объектива ( $\Phi$ ) определится с погрешностью  $\Delta \Phi$ , причем:

$$\Phi + \Delta \Phi = (n' + \Delta n' - 1)c' + (n'' - 1)c'', \quad (207)$$

откуда:

$$\Delta \Phi = \Delta n' c'. \quad (208)$$

На основании (203), (205) и (206) выразим оптическую силу в виде:

$$\Phi = (n' - 1)c' \left( \frac{v' - v''}{v'} \right), \quad (209)$$

после чего относительная погрешность

$$\frac{\Delta \Phi}{\Phi} = - \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta n'}{(n' - 1)} \cdot \frac{v'}{(v' - v'')}. \quad (210)$$

Примем с достаточным правдоподобием для кроновой линзы  $n' = 1,5$  и  $v' = 60$ , и посмотрим, как будет изменяться  $\frac{\Delta\Phi}{\Phi}$  в зависимости от  $\Delta n'$  (или наоборот) при различных значениях числа Аббе  $v''$  флинтовой линзы. Результаты таких вычислений в соответствии с (210) приведены в табл. 27, дающей значения  $\Delta n'$  для четырех значений  $v''$ , при которых  $\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = -\frac{\Delta F}{F}$  равно 1%, 0,1% и 0,01%.

[ $\Delta n'$  при  $n' = 1,5$  и  $v' = 60$ ]

Таблица 2

| $v''$                                                             | 30                                                                | 40                                                                | 50                                                          | 55                                                          |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $v' - v''$                                                        | 30                                                                | 20                                                                | 10                                                          | 5                                                           |
| $\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = -\frac{\Delta F}{F}$ (1%, 0,1%, 0,01%) | $2,5 \cdot 10^{-3}$<br>$2,5 \cdot 10^{-4}$<br>$2,5 \cdot 10^{-5}$ | $1,7 \cdot 10^{-3}$<br>$1,7 \cdot 10^{-4}$<br>$1,7 \cdot 10^{-5}$ | $8 \cdot 10^{-4}$<br>$8 \cdot 10^{-5}$<br>$8 \cdot 10^{-6}$ | $4 \cdot 10^{-4}$<br>$4 \cdot 10^{-5}$<br>$4 \cdot 10^{-6}$ |

У обычных ахроматов разность чисел Аббе ( $v' - v''$ ) близка к 30 единицам; у полуахроматов  $v' - v''$  обычно больше 10, но меньше 20 единиц; наконец, у апохроматов  $v' - v''$  может быть меньше 10 и приближаться к 5 единицам. Поэтому нашу таблицу можно пояснить следующим образом. Если мы хотим выполнить фокусное расстояние объектива с точностью 1%, то в случае обычного ахромата необходимо знать показатель преломления кроновой линзы с точностью около двух единиц третьего знака; в случае же апохромата, тот же показатель преломления должен быть измерен с точностью нескольких единиц четвертого знака. Если считать, что от плавки к плавке показатель преломления изменяется в четвертом знаке, то для такого двухлинзового ахромата можно брать значение  $n'$  из каталога, тогда как для такого же апохромата необходимо выполнить измерение  $n'$  у данной заготовки стекла.

Но точность  $\frac{\Delta F}{F} = 1\%$  является слишком грубой, и если бы нам было поставлено условие обеспечить  $F$  с точностью 0,01%, то показатель преломления  $n'$  пришлось бы измерять с точностью до единиц пятого знака для обычного ахромата и с точностью до единиц шестого знака для апохромата, а последнее измерение уже лежит близко к пределу возможного.

Предположив, что показатель преломления кроны нам абсолютно точно известен, мы аналогичным образом находим зависимость:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta n''}{(n'' - 1)} \frac{v''}{(v' - v'')} \quad (211)$$

Так как  $n''$  мало отличается от  $n'$ , тогда как  $v''$  в обычных ахроматах значительно меньше  $v'$ , то измерение показателя пре-

ломления флинтовой линзы можно делать грубее ( $\Delta n'' > \Delta n'$ ). Применим наши выводы к следующему частному заданию.

Требуется изготовить двухлинзовый полуахромат с фокусным расстоянием  $F = 5000$  мм при  $\Delta F = \pm 10$  мм. У кроновой линзы  $n' = 1,516$  и  $v = 64$ ; у флинтовой линзы  $n'' = 1,526$  и  $v'' = 51,5$ .

Выражения (210) и (211) дают после соответственных подстановок:

$$\Delta n' = 2,0 \cdot 10^{-4}, \\ \Delta n'' = 2,6 \cdot 10^{-4}.$$

Так как выражения (210) и (211) выводились в предположении, что показатель преломления одного из стекол известен абсолютно точно, чего нет в действительности, то найденные  $\Delta n'$  и  $\Delta n''$  необходимо уменьшить вдвое.

Таким же образом следует уменьшить и числа табл. 27, а выражения (210) и (211) можно представить для двухлинзового объектива в следующем окончательном виде:

$$\Delta n' = \frac{(n' - 1)(v' - v'')}{2v'} \cdot \frac{\Delta F}{F}, \quad \Delta n'' = \frac{(n'' - 1)(v' - v'')}{2v''} \cdot \frac{\Delta F}{F}. \quad (212)$$

Это и будут допуски на точность измерения среднего показателя преломления кроновой и флинтовой линз двухлинзового астрономического ахромата, удовлетворяющего единственному пока условию: соблюдению фокусного расстояния  $F$  с допуском  $\Delta F$  \*).

Но так как объектив, кроме того, должен быть освобожден от сферической аберрации и комы и иметь надлежащую форму ахроматизации, то следовало бы вывести допуски  $\Delta n'$  и  $\Delta n''$ , при которых волновая сферическая аберрация, при заданных светосиле и диаметре объектива, не изменяется более чем на некоторую заданную величину (например на  $1/\lambda$ ), или при которых кома не превышает некоторой заданной величины при заданных светосиле, диаметре и угле поля зрения объектива, или, наконец, при которых вершина хроматической кривой не выходит за пределы некоторого заданного спектрального интервала; в последнем случае  $\Delta n'$  и  $\Delta n''$  должны быть установлены по крайней мере для трех различных длин волн.

Предполагая в скором будущем написать работу вообще о допусках для оптических деталей и систем, я здесь не выполняю такого исследования и ограничиваюсь лишь постановкой этого актуального, но трудного для исследования вопроса \*\*).

\*) Строго: если имеются погрешности  $\Delta n'$  и  $\Delta n''$ , то относительная ошибка фокусного расстояния будет

$$\frac{\Delta F}{F} = \left( \Delta n' \frac{v'}{n' - 1} + \Delta n'' \frac{v''}{n'' - 1} \right) \frac{1}{v' - v''}.$$

(Прим. ред.)

\*\*) К сожалению, такое исследование Д. Д. Максимумым выполнено не было. (Прим. ред.)

Во всяком случае практика показывает, что для расчета и изготовления хорошего астрономического ахромата требуется измерение показателей преломления стекол с точностью до 1—2 единиц пятого знака, а для такого же апохромата — до 5 единиц шестого знака.

Приятное исключение из этого правила представляют призмы, для которых показатели преломления можно определять самым грубым образом; практически же достаточно в этом случае убедиться по косвенным признакам, например, по удельному весу, что стекло принадлежит к данному сорту, а затем использовать для показателей преломления данные из каталога оптического стекла. Действительно, отклонения истинных среднего показателя преломления и дисперсии от расчетных скажутся только в том, что спектр несколько сместится и несколько изменится по длине против того, что мы ожидали. Никакого же снижения качества изображения при этом не произойдет, так как призмы работают в параллельных пучках \*).

Для измерения показателей преломления применяются различные методы, которые перечислим в порядке возрастания их точности; это: метод Обрепмова, метод рефрактометра, метод гониометра и интерферометрические методы. Соответственно показатели преломления определяются с точностью единиц 4-го знака, нескольких единиц 5-го знака, 1—2 единиц 5-го знака и нескольких единиц 6-го знака. Все эти методы требуют образца, отделяемого от заготовки стекла; причем, для метода Обрепмова достаточно отколоть небольшой бесформенный кусочек стекла, погружаемый затем в иммерсию с переменным и контролируемым нами показателем преломления; для рефрактометра необходим небольшой кубик стекла с двумя отшлифованными и отполированными гранями; для гониометра приходится изготовить сравнительно крупную призму с двумя точными плоскими гранями; для интерферометрического метода требуется сравнительно небольшая, но точно изготовленная плоскопараллельная плита. Таким образом, наибольший расход стекла на изготовление образца для измерения требует гониометрический метод. И все же этот метод является наиболее употребительным и надежным; он дает абсолютное значение показателя преломления  $n_d$  без посредства каких-либо эталонных призм или плиток, и он достаточно чувствителен для большинства практических целей.

Описание теории и техники гониометрических и других измерений показателя преломления мы здесь излагать не собираемся, предполагая хотя бы элементарное знакомство с ними читателя; отметим лишь некоторые практические подробности и особенности гониометрических измерений применительно к задачам астрономической оптики \*\*).

\*) Столь же приятное исключение, как известно, представляют и мениски менниковых систем автора.

\*\*) См. список дополнительной литературы в предисловии редакции. (Прим. ред.)

Чтобы извлечь из хорошего гониометра ту точность измерения, на которую он потенциально способен, необходимо изготовить призму достаточно большого размера, т. е. с достаточно большим углом и с достаточно широкими сторонами; первое условие обеспечивает большой угол отклонения и большую угловую дисперсию, а второе — высокую разрешающую силу и чувствительную наводку пикти на центр спектральной линии. Но в таком случае для призмы приходится отделить значительную часть от заготовки стекла для будущей линзы в ущерб размерам линзы.

В 1933 г. я предложил и ввел в практику следующий выход из затруднительного положения. Вместо круглых заготовок для линз объектива я заказал на заводе оптического стекла заготовки формы, изображенной на рис. 108. По прерывистой прямой

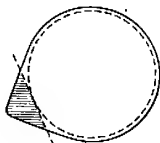


Рис. 108.

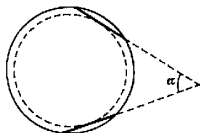


Рис. 109.

линии отшлифовывается заштрихованная часть, из которой шлифуется в дальнейшем призма для измерения показателей преломления на гониометре, по прерывистой окружности круглится линза будущего объектива; потеря стекла оказывается незначительной, а моллирование заготовок такой формы не представляет особых трудностей \*).

При изготовлении призмы следует содрать слой стекла на глубину не менее 2—3 мм от внешних поверхностей заготовки, так как в этом слое можно ожидать значительных оптических неоднородностей. О размерах призмы будет сказано дальше.

Существует и, по-видимому, давно применяется за границей еще и такой способ: на круглой заготовке (рис. 109) пашлифовываются две плоские поверхности под углом  $\alpha$ , и тем самым заготовка превращается в призму с преломляющим углом  $\alpha$  и ставится на столлик гониометра для измерения показателей преломления. В дальнейшем линза круглится по штриховой окружности. Такой способ пригоден лишь для линз умеренного диаметра (не более ~ 200 мм), так как линзы более крупные не уложить на столлик обычного гониометра, тем более, что расположенные линзы на столлике должны быть эксцентричным.

\*) Недавно ко мне попала одна из заготовок стекла Шотта, имеющая форму рис. 108. По-видимому, в последние годы данный метод применялся и в Германии. Установить приоритет в этом вопросе пока не удалось. [Это примечание было написано автором в 1947 г.]

Существует два типа гонометров: нормальный (рис. 110, а), состоящий из коллиматора  $K$ , трубы  $T$ , между которыми помещается исследуемая призма  $P$ , и автоколлимационный (рис. 110, б), в котором автоколлимационная труба  $A$  играет роль и коллиматора и трубы, а призма  $P'$ , часто называемая полупризмой, имеет посеребренную грань, действующую как плоское

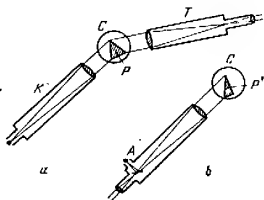


Рис. 110.

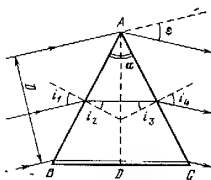


Рис. 111.

зеркало и возвращающую отраженные от нее пучки в обратном направлении. Для нормальной схемы предпочтительно готовить призму с преломляющим углом около  $60^\circ$ ; таким же образом для автоколлимационной схемы угол у полупризмы желательно иметь близким к  $30^\circ$ . Впрочем, сейчас мы постараемся выяснить влияние угла призмы на точность измерения показателей преломления и на размеры призмы.

При установке призмы на угол наименьшего отклонения для некоторого параллельного монохроматического пучка, этот пучок внутри призмы должен быть перпендикулярен к биссектрисе преломляющего угла призмы. Таким же образом при полупризме пучок внутри призмы должен быть перпендикулярен к ее зеркальной грани. Ход монохроматического пучка длины волны  $\lambda$  изображен на рис. 111. Здесь призма  $ABC$  имеет показатель преломления  $n_\lambda$  и преломляющий угол  $\alpha$ . Очевидно, что полупризмой является часть  $ABD$ , причем грань  $AD$  предпочтительно иметь посеребренную. Легко доказывается, что:

$$\sin i_1 = \sin i_4 = n_\lambda \sin \frac{\alpha}{2} \quad (213)$$

и что угол отклонения для случая наименьшего отклонения:

$$\epsilon_\lambda = 2i_1 - \alpha. \quad (214)$$

Но разрешающая сила гонометра (при высоком качестве его объективов) достигает максимума в том случае, когда проекция действующего пучка в плоскости чертежа рис. 111 покрывает весь диаметр объектива ( $D$ ) коллиматора и трубы.

Для этого наимыгоднейшего случая грани призмы  $AB = AC$  не должен быть меньше:

$$AB = AC = \frac{D}{\cos i_1}. \quad (215)$$

Пользуясь последними тремя выражениями, составим табл. 28 значений  $\epsilon_1$  и  $AB$  для различных значений преломляющего угла  $\alpha$  и для трех значений показателя преломления  $n$ . В последних строках таблицы даются, кроме того, площади ( $S$ ) поперечного сечения призмы, выраженные в долях площади отверстия объективов коллиматора и трубы  $\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)$ . Зная площадь  $S$  и высоту призмы, можно вычислить ее объем, а зная удельный вес стекла — определить вес призмы. Так как высота призм может быть

Таблица 28

| $\alpha$                |           | 20°    | 30°    | 40°    | 50°    | 60°    | 70°    |
|-------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $l$                     | $n = 1,5$ | 15°06' | 22°51' | 30°52' | 30°20' | 48°35' | 59°21' |
|                         | $n = 1,6$ | 16°08' | 24°28' | 33°40' | 42°33' | 53°08' | 66°36' |
|                         | $n = 1,7$ | 17°10' | 26°06' | 35°33' | 45°56' | 58°13' | 77°41' |
| $\epsilon$              | $n = 1,5$ | 10°42' | 15°42' | 21°44' | 28°40' | 37°10' | 48°42' |
|                         | $n = 1,6$ | 12°16' | 18°56' | 26°20' | 35°06' | 46°16' | 63°42' |
|                         | $n = 1,7$ | 14°20' | 22°42' | 31°06' | 41°52' | 56°26' | 84°22' |
| $AB : D$                | $n = 1,5$ | 1,036  | 1,085  | 1,165  | 1,292  | 1,511  | 1,961  |
|                         | $n = 1,6$ | 1,041  | 1,099  | 1,195  | 1,357  | 1,666  | 2,518  |
|                         | $n = 1,7$ | 1,047  | 1,114  | 1,229  | 1,438  | 1,899  | 4,508  |
| $S : \frac{\pi D^2}{4}$ | $n = 1,5$ | 0,234  | 0,375  | 0,555  | 0,814  | 1,259  | 2,300  |
|                         | $n = 1,6$ | 0,236  | 0,384  | 0,584  | 0,898  | 1,530  | 3,793  |
|                         | $n = 1,7$ | 0,239  | 0,395  | 0,618  | 1,008  | 1,988  | 12,16  |

различной и определяется толщиной заготовки для линзы, то площадь  $S$ , отнесенная к площади поперечного сечения заготовки для линзы, хорошо характеризует потерю стекла на изготовление образца для гониометрических измерений\*).

При заданной точности ( $\Delta$ ) измерения углов на гониометре, точность ( $\Delta n$ ) измерения показателя преломления будет расти с ростом углов  $\alpha$  и  $\epsilon$ . Нетрудно установить следующую связь из выражений (243) и (244):

$$n = \frac{\sin \frac{\epsilon + \alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \sin \frac{\epsilon}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + \cos \frac{\epsilon}{2}; \quad (246)$$

\*) В случае полупризмы площадь  $S$ , а в дальнейшем и вес призмы  $P$  следует уменьшить вдвое.



при измерении углов  $\alpha$  и  $\varepsilon$  мы допускаем некоторую погрешность  $\Delta$ , зависящую от свойств данного гониометра и опыта наблюдателя. Поэтому и показатель преломления  $n$  мы определяем с некоторой погрешностью, которая выводится из (216) в следующем виде:

$$\Delta n = -\frac{\Delta}{2} \sin \frac{\varepsilon}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \left( \operatorname{ctg} \frac{\varepsilon}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right). \quad (217)$$

Воспользовавшись таблицей 28, разовьем последнее выражение в табл. 29, в предположении, что  $\Delta = \pm 10^{-6}$  (т. е. около  $\pm 2$  секунд дуги).

Таблица 29

$[\Delta = 10^{-6}]$

| $\alpha$   |           | 20°                  | 30°                  | 40°                  | 50°                  | 60°                  | 70°                  |
|------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\Delta n$ | $n = 1,5$ | $4,25 \cdot 10^{-6}$ | $2,80 \cdot 10^{-6}$ | $2,06 \cdot 10^{-6}$ | $1,61 \cdot 10^{-6}$ | $1,30 \cdot 10^{-6}$ | $1,07 \cdot 10^{-6}$ |
|            | $n = 1,6$ | $4,54 \cdot 10^{-6}$ | $2,99 \cdot 10^{-6}$ | $2,20 \cdot 10^{-6}$ | $1,75 \cdot 10^{-6}$ | $1,39 \cdot 10^{-6}$ | $1,14 \cdot 10^{-6}$ |
|            | $n = 1,7$ | $4,82 \cdot 10^{-6}$ | $3,17 \cdot 10^{-6}$ | $2,34 \cdot 10^{-6}$ | $1,82 \cdot 10^{-6}$ | $1,47 \cdot 10^{-6}$ | $1,21 \cdot 10^{-6}$ |

Так как для измерения каждого из углов  $\alpha$  и  $\varepsilon$  необходимо выполнить по две паводки, то при  $\Delta = 2$  необходимо иметь гониометр 1-секундной точности. На таком гониометре возможны, как мы видим, измерения показателя преломления с точностью до 1—2 единиц пятого знака после занятой при условии, что угол  $\alpha$  превосходит 40°; при многократных повторных измерениях можно еще несколько повысить эту точность. Повышать значение угла  $\alpha$  более  $\sim 50^\circ$  нецелесообразно, так как выигрыш в точности измерения получается небольшой, а рост объема и веса призмы оказывается значительным.

Объем стекла призмы пропорционален площади ее поперечного сечения  $S$ ; при этом высоты призм нас не интересуют, так как они зависят от толщин стеклянных заготовок для линз и не влияют на разрешающую силу гониометра. Составим табл. 30 для величин  $k(S \cdot \Delta n)$ , воспользовавшись материалом табл. 28 и табл. 29; при этом коэффициент пропорциональности  $k$  подбираем из соображений наглядности таблицы:

Таблица 30

| $\alpha$              |           | 20°  | 30°  | 40°  | 50°  | 60°  | 70°  |
|-----------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|
| $k(S \cdot \Delta n)$ | $n = 1,5$ | 1,00 | 1,06 | 1,16 | 1,32 | 1,64 | 2,48 |
|                       | $n = 1,6$ | 1,08 | 1,16 | 1,29 | 1,55 | 2,14 | 4,35 |
|                       | $n = 1,7$ | 1,16 | 1,26 | 1,46 | 1,84 | 2,94 | 14,8 |

Поясним эту таблицу. Если бы с ростом  $S$  пропорционально возрастала точность  $\left(\frac{1}{\Delta n}\right)$  измерения показателя преломления,

то произведение  $S\Delta n$  было бы постоянным, например, равным единице. Но мы видим, что с увеличением  $\alpha$  площадь  $S$  растет быстрее роста точности измерения, и произведение  $S \cdot \Delta n$ , сперва медленно, а затем очень быстро увеличивается, достигая, например, для призмы из стекла  $n = 1,7$  при  $\alpha = 70^\circ$  пятнадцатикратного значения.

Повышение точности измерения показателя преломления мы покупаем ценой увеличения размеров призмы; но так как мы не согласны покупать его слишком дорогой ценой, то от применения призм с чрезмерно большими углами  $\alpha$  мы откажемся.

Практические и экономические соображения указывают нам, что для флиптовых призм не стоит брать угол  $\alpha$ , превышающий  $\sim 50^\circ$ , тогда как для кроновых призм тот же угол можно доводить до  $\sim 60^\circ$ ; табл. 30 иллюстрирует это заключение.

До сих пор мы предполагали, что пучок лучей, проходящих через призму, покрывает диаметры ( $D$ ) объективов коллиматора и трубы гониометра, а потому разрешающая сила оптики гониометра используется полностью.

Но зная размеры и аберрационных свойств оптики гониометра, мы не можем сказать, достаточно ли ее разрешающая сила, чтобы осуществить наводку нити на спектральную линию с чувствительностью, соответствующей точности лимба.

Поэтому в одних случаях (точные лимбы и отсчетные приспособления, но малые диаметры  $D$  объективов) необходимо следовать выражению (215), в других же случаях (грубые лимбы и преувеличенно крупная оптика труб) можно отступать от выражения (215), уменьшая размеры призм. Этого интересного вопроса, требующего в каждом случае индивидуального решения, мы здесь рассматривать не будем.

В заключение скажем, что точность больших лабораторных гониометров ( $1 \cdot 10^{-5} < \Delta n < 2 \cdot 10^{-5}$ ) не для всех случаев оптической практики достаточна. Изготовление апохроматов требует знания  $n_d$  с точностью  $\Delta n_d \sim 5 \cdot 10^{-6}$ , и для таких измерений приходится пользоваться более сложным интерферометрическим методом измерения показателя преломления.

**Исследование оптических неоднородностей.** Если заготовка для будущей линзы объектива представляет собой стеклянный диск или плитку, у которых поверхности приблизительно плоские и приблизительно параллельные, то такую заготовку, после соответственной шлифовки и полировки, лучше всего исследовать по схеме рис. 112. Здесь:  $A$  — испытуемый диск или плитка;  $B$  — вспомогательное вогнутое сферическое зеркало с центром кривизны вблизи точки  $S$ ;  $S$  — светящаяся точка;  $N$  — нож Фуко. Так как с тепевым методом мы уже ознакомились, то и принципиальная схема рис. 112 не требует пояснений.

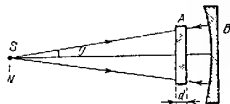


Рис. 112.

По некоторые частные особенности этой схемы все же должны быть пояснены. Даже в случае, когда диск  $A$  имеет строго плоские и параллельные поверхности, он вносит некоторую сферическую aberrацию, зависящую от показателя преломления  $n$  заготовки от ее толщины  $d$  и от апертурного угла  $U$ ; чтобы сферическая aberrация не оказалась чрезмерно большой, следует пользоваться умеренными значениями угла  $U$ , т. е. не применять слишком короткофокусных вспомогательных зеркал  $B$ . Так, для исследования достаточно крупных и толстых заготовок  $A$  желательно, чтобы у зеркала  $B$  отношение его диаметра к радиусу кривизны не превосходило  $\sim 1:10$ .

Предположим далее, что плоскопараллельный диск  $A$  не перпендикулярен к оси установки, но наклонен на некоторый угол. В этом случае схема рис. 112 приобретает aberrации наклонных пучков, т. е. кому и астигматизм. Но и эти aberrации, при данном угле наклона диска и данной его толщине, будут тем меньше, чем меньше апертурный угол  $U$ ; вот вторая причина, заставляющая нас пользоваться вспомогательным зеркалом  $B$  с умеренным относительным отверстием ( $D:R$ ). Заметим, что перпендикулярность диска  $A$  оптической оси проверяется весьма примитивно, но зато просто и быстро: глаз, расположенный зади точки  $S$ , наблюдает изображения точки  $S$ , полученные в результате отражения лучей от обеих поверхностей диска  $A$ , в виде двух бликов; если эти блики появились на поверхности диска, то наклон диска к оси не превышает угла  $U$ ; если эти блики достаточно близки к центру диска, то установка диска перпендикулярно оси выполнена достаточно хорошо.

Предположим далее, что поверхности диска  $A$  не строго параллельны, но что диск в действительности представляет собой клин с некоторым небольшим углом  $\alpha$  при вершине. И в этом случае схема рис. 112 приобретает aberrации комы и астигматизма, растущие с ростом апертурного угла  $U$ , — и вот третья причина, заставляющая нас применять зеркало  $B$  с умеренным относительным отверстием ( $D:R \leq 1:10$ ).

Клиновидность заготовки  $A$  приводит в то же время к дисперсии света, и вместо белого изображения точки  $S$  мы получаем на плшке  $N$  изображение в виде спектрика, направление которого ориентировано в зависимости от направления клина в заготовке  $A$ . Перекрывая такой спектрик пожком Фуко, мы в одних случаях будем наблюдать «красную» тепевую картину, а в других «синюю», в зависимости от того, с какой стороны — фиолетовой или красной — этот спектрик перекрывается пожком. Так как дисперсия стекол в красной части спектра меньше, чем в сине-фиолетовой, и так как спектральная чувствительность глаза более резко падает к красному концу спектра, чем к фиолетовому, — то «красные» тепевые картины всегда контрастнее и чувствительнее «синих»; а потому, если у заготовки  $A$  есть клин, мы ориентируем его так, чтобы наблюдать «красную» тепевую картину. При применении монохроматического источника для за-

светки точки  $S$  указанные сейчас помехи из-за клиновидности заготовки, естественно, должны отпасть.

Предположим далее, что поверхности заготовки  $A$  не вполне плоские, и образец, подобно очень слабой линзе, имеет оптическую силу, отличную от нуля. В этом случае в схеме рис. 112 придется сместить  $S$  и  $N$  несколько вперед или назад вдоль оптической оси в зависимости от знака, оптической силы заготовки  $A$ , пока изображение точки  $S$  не окажется в плоскости глаза  $N$ .

Наконец, предположим, что одна или обе поверхности заготовки  $A$  имеют зональные ошибки, которые, по своему определению, располагаются в виде концентрических колец; допустим, что заготовка имеет не круглую (что более выгодно), а прямоугольную форму. В этом случае теплая картина зональных ошибок будет выглядеть, например, так, как это изображено на рис. 113, и мы такую картину всегда отличим от картины местных оптических неоднородностей. Наблюдая в окуляр предфокальное и зафокальное изображение точки, мы получим картины, схематически изображенные в нижней части того же рисунка, причем эти картины сохраняют симметрию относительно центра, хотя и не будут подобны одна другой. Зональные ошибки, конечно, снижают чувствительность исследования, но если они малы, то вполне возможно на фоне их картины распознать картину свилей и местных неоднородностей\*).



Рис. 113.

Итак, хорошим по однородности стеклом будет такое, у которого теплая картина или внефокальные изображения точки в окуляре указывают на зональную симметрию волнового фронта, т. е. что фронт волны представляет собой поверхность вращения вокруг оси, проходящей через центр заготовки. Пусть в такой заготовке в действительности имеют место концентрические (зональные) неоднородности, неотличимые от зональных ошибок поверхностей, — это не мешает нам изготовить из таких заготовок хороший объектив, так как зональные неоднородности удается легко и просто компенсировать зональной ретушью объектива, часто даже не подозревая об их наличии. Для компенсации же местных неоднородностей (и тем более свилей) ретушь оказывается либо слишком трудной, либо

\* Народное предприятие Карл Цейс (Йена, ГДР) выпускает приборы «спир-фотометр» и прибор для исследования напряжений «300». Первый позволяет наблюдать и количественно оценивать неоднородности заготовок и свилей в них (правда, лишь по частям), второй — измерять внутренние напряжения в заготовках. (Прим. ред.)

даже невозможной. Вот почему при исследовании заготовки мы стремимся выявить и оценить только местные неоднородности — илавные или сосредоточенные.

В свете этих рассуждений оказывается, что обработка двух поверхностей заготовки для ее исследования в схеме рис. 112 не представляет больших трудностей и может быть быстро и дешево осуществлена. Действительно: у заготовки можно допустить некоторую непараллельность сторон или «клин», и если этот клин не превышает —  $\frac{1}{100}$ , то вносимые им помехи не слишком

велики; поверхности заготовки не обязаны быть строго плоскими, но могут иметь стрелки кривизны, измеряемые сотыми долями миллиметра, поэтому и проверка таких плоскостей может быть осуществлена не оптическим способом, а «под линейку»; поверхности не обязаны при этом иметь строго сферическую форму, но, оставаясь поверхностями вращения вокруг центральной оси, они могут обладать некоторыми зональными ошибками; наконец, поверхности не обязаны быть «чисто» отполированными: значительное даже количество царапин и явные следы недополированного мата не мешают выполнению исследования, если такая матовость достаточно равномерно распределена до поверхности.

Обработку поверхностей заготовки можно вести вручную на не слишком скверной планшайбе, вращающейся на шпинделе станка, причем заготовка держится в руках, равномерно поворачивается и движется возвратно-поступательно при прямолинейном штрихе нормальной длины. Приклеивание к заготовке какой-либо рукоятки или наклеивание заготовки на вторую планшайбу является нежелательным, так как у нас не будет уверенности в том, что при наклейке не возникли в стекле напряжения, которые после отклейки приведут к местным деформациям поверхностей: ведь мы не предполагаем контролировать форму поверхностей и полагаемся в значительной степени на указанное ранее свойство метода шлифовки обеспечивать высокую точность «макроповерхности» при взаимной притирке двух поверхностей (стекла и шлифовальника).



Рис. 114.

Так как отдельные ячейки более грубого мата для нашего исследования не страшны, то, во-первых, можно уменьшить число ступеней перехода от крупного абразива к абразиву самому мелкому и, во-вторых, можно не добиваться полного устранения илечек мата от предыдущего номера абразива и, тем более устранения разрушенного шлифовкой подслоя. Пусть отполированная поверхность выглядит так, как это схематически изображено на рис. 114, но у такого «полуматового» стекла все же оказывается достаточное число микроплощадок  $a$ , чтобы создать достаточное количество правильно преломленного света, конкурирующего с рассеянным светом.

Если процесс последней тонкой шлифовки мы сознательно удлиняем до получения хорошей притирки стекла к планшайбе, что чувствуется и по значительному их присасыванию друг к другу и по наблюдению их поверхностей в косых лучах, то процесс полпривки мы стараемся сделать возможно более кратковременным, хотя бы и в ущерб полной стойке мата: мы помним, что при неконтролируемой полировке можно легко и неощутимо для мастера деформировать точную макроповерхность, полученную почти автоматически в процессе шлифовки.

В схеме рис. 112 лучи света проходят через заготовку дважды, т. е. на пути лучей четырежды становятся полуматовые поверхности. Поэтому значительные остатки мата и, особенно, мат неравномерный, могут заметно помешать исследованию и снизить его чувствительность.

В этом смысле более выгодной была бы схема последования, изображенная на рис. 115, где  $K$  — коллиматор со светящейся точкой  $S$ ,  $A$  — испытуемая заготовка и  $T$  — труба, в фокусе которой расположен пож Фуко  $N$ . Такая схема имеет еще и то преимущество, что через заготовку  $A$  проходит параллельный

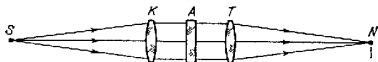


Рис. 115.

пучок лучей, а потому заготовка может обладать значительным клином (при монохроматическом освещении) и быть как угодно косо поставленной в параллельном пучке. К сожалению, для достаточно крупных заготовок  $A$  в нашем распоряжении может не оказаться столь же крупных объективов для коллиматора и трубы, причем эти объективы должны быть весьма высокого качества и свободными от оптических неоднородностей в линзах. Вот почему схема с длиннофокусным вогнутым зеркалом находит широкое применение при исследовании заготовок для крупной астрономической оптики.

Для заготовок умеренного размера оказывается выгодным применить иммерсионную схему исследования, при которой ошибки поверхностей заготовки практически исключаются. Для этого к заготовке  $A$  прикладываются (примазываются) на иммерсии с соответственным показателем преломления две пластинки из однородного стекла, причем внешние поверхности этих пластинок должны иметь точную квазиплоскую форму. В этом случае поверхности заготовки можно не только не полпривать, но даже и не прошлифовывать (тонкими наждаками \*). К сожа-

\*) Краткое описание приборов для исследования неоднородностей можно найти в моей книге: «Новые катодоптрические менисковые системы». — Труды ГОИ, 1944, вып. 124, с. 124—126. На рис. 116 изображен верный образец такого моего прибора (1940 г.).

нию, изготовление соответственного прибора для исследования заготовки с диаметром более  $\sim 200$  мм оказывается достаточно дорогим и трудным.

Если заготовка стекла выполнена не в форме диска или плитки, но имеет заметно вогнутые или выпуклые поверхности, то



Рис. 116.

для схемы ее исследования нельзя дать общего рецепта, не зная значений радиусов кривизны поверхностей и соотношения этих кривизн. Для положительных линз-заготовок вопрос выбора схемы исследования решается легче, чем для отрицательных

линз-заготовок; в каждом конкретном случае оптик старается, хорошо или худо, решать эту индивидуальную задачу.

Оптики предпочитают получать заготовки для линз в виде дисков только потому, что их исследование на свили и неоднородности может быть проще всего и чувствительнее всего выполнено, хотя с экономической и производственной точек зрения выгоднее всего было бы придавать заготовкам стекла на заводе оптического стекла форму, наиболее близкую к форме будущего изделия.

Для исследования заготовок призм приходится, строго говоря, осуществлять установку в виде спектроскопа, т. е. между коллиматором  $K$  и соответственно повернутой трубой  $T$  рис. 115 установить заготовку призм с точно отполированными плоскими поверхностями. При больших углах призм и при наклонно падающих на них параллельных пучках здесь нельзя уже довольствоваться квазиплоскими поверхностями, так как незначительная даже их кривизна приводит к заметным абберациям, из которых кома может создать ложное представление о наличии в стекле плавной неоднородности.

В этом случае заготовка обрабатывается почти с той же точностью, что и будущее изделие, если не считать смягчений от возможности грубо выполнять величину преломляющего угла и не заботиться о чистоте поверхностей и полной спайке мата. Вот почему и для призм предпочтительнее иметь заготовку в виде кубка, из которого в дальнейшем после его контроля удастся выкроить две призмы. К сожалению, для крупных астрономических призм такой путь оказывается слишком дорогим и трудным.

Строгое количественное исследование неоднородностей и свилей стекла, затронутое нами в гл. III, оказалось бы очень громоздким и трудоемким; его можно применять в исключительных и ответственных случаях, как это имело место у нас при отборе заготовок для линз 32-дюймового (813 мм) пулковского объектива; в большинстве же случаев мы обходимся качественной оценкой неоднородностей стекла и, полагаясь на значительный опыт в этом деле, довольно уверенно даем оценку исследуемому стеклу. В роли такого «стекольного дегустатора» я пребываю уже в течение многих лет и проверяю таким образом большую часть заготовок стекла для крупной оптики, изготавливаемой в мастерских ГОИ. Не берусь судить, достоин ли такой способ исследования одобрения или порицания, но он оказывается наиболее быстрым и дешевым и не приводил пока к заметно ошибочным заключениям.

Так как заготовка в виде диска или плитки всегда имеет избыточные размеры по сравнению с будущим изделием, то далеко не все свили, наблюдаемые в заготовке, останутся в изделии, например, в линзе. Поэтому во многих случаях бывает необходимо определить *глубину залегания свилей*.

Выполняется это сравнительно просто при использовании стереоскопического метода наблюдения свилей. Не вдаваясь в



подробности различных видоизменений стереоскопического метода, я вкратце опишу одну из разновидностей, примененную при исследовании заготовок для линз 32-дюймового объектива (рис. 117).

Отполированная заготовка  $A$  устанавливается перед экраном  $\mathcal{E}$ . На одной из поверхностей заготовки расчерчивается тушью

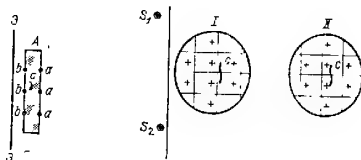


Рис. 117.

сетка (точки  $a$ ), а на другой стороне отмечаются тушью крестики (точки  $b$ ). Прикалываем к экрану  $\mathcal{E}$  светочувствительную фотографическую бумагу, помещаем светящуюся точку в  $S_1$  и после достаточной экспозиции получаем первый снимок ( $I$ ) с изображением квадратиков сетки ( $a$ ) и крестиков ( $b$ ), а также и свилей ( $c$ ). Затем прикалываем к экрану новый лист фотографической бумаги, переносим светящуюся точку из  $S_1$  в  $S_2$ , производим экспозицию и получаем второй снимок ( $II$ ), на котором изображения крестиков и изображения свилей смещены относительно квадратной сетки. Измеряя одни и другие смещения, мы легко определяем относительную глубину залегания свилей; зная толщину диска  $A$ , мы определяем абсолютную глубину залегания свилей.

Измерение смещений производится с помощью масштабной линейки на глаз с точностью до  $\sim 0,2$  мм.

Располагая в точках  $S_1$  и  $S_2$  теневой прибор с камерой для получения «фокограмм» и заменяя экран  $\mathcal{E}$  вогнутым сферическим зеркалом, мы имеем возможность сфотографировать две стереоскопические теневые картины, а затем, рассматривая их в стереоскоп, ощущать пространственное расположение не только свилей, но и местных неоднородностей \*).

Заключив с исследователем заготовок стекла и признав их годными для изготовления линз объектива, мы приступаем к приданию линзам грубой формы, выкраивая их из заготовки таким образом, чтобы возможно большая часть вредных свилей или неоднородностей оказалась вне контуров будущего изделия; это мы можем сделать, если глубина залегания свилей и местных неоднородностей нам известна.

\*) Максугов Д. Д. Исследование диска крон  $\varnothing 850$  мм... — Журн. Оптико-мех. промышленности, 1932, № 10.

В процессе придания линзе грубой формы мы пользуемся не только грубой обдиркой шлифовальниками или обработкой карборундовыми кругами, но и распиловкой стекла, удаляя при этом значительные объемы стекла. При изготовлении линзы 32-дюймового объектива мы, например, с успехом применяли для этой цели столярную лучковую пилу, закрепили в ней стальное полотно железной или латушной лентой; абразив, в виде карборундовой кашицы, подводился сперва на кромку лепты, а затем в канавку распила. Таким образом мы отделяли от заготовки стекла значительные клинообразные пласти при глубине пропила более 15 см, приближая заготовку к форме будущей выпуклой линзы. Даже такая примитивная ручная распиловка позволяет сэкономить много времени и абразива, так как грубая обдирка таких же объемов стекла с помощью абразивных кругов и, тем более, шлифовальников, выполняется значительно медленнее.

Подготовленную таким способом заготовку крупной линзы мы обдирали алюминиевым шлифовальником уменьшенного диаметра, стремились придать поверхности приблизительно сферическую форму и кривизну, не сильно отличающуюся от заданной.

Избрав одну из поверхностей линзы в качестве опорной, мы устанавливали линзу опорной поверхностью вниз на станок для кругления и круглили линзу по ободу до заданного диаметра, как это было описано в гл. VI.

При обдирке второй поверхности линзы необходимо добиться возможно лучшего устранения клина, т. е. получить линзу с постоянной толщиной на внешней зоне (по ободу). На этой стадии работы величина клина у линзы может достигать нескольких десятых долей миллиметра, а припуск по толщине — нескольких миллиметров: линза грубо приняла нужную форму и грубо отцентрирована.

Затем опорная поверхность линзы подвергается тонкой шлифовке на разгрузочном столе шлифовальной машины и приобретает заданную кривизну и тонкий мат. Можно продолжить работу и, не снимая линзы со шлифовальной машины, закончить полировку опорной поверхности, а затем залакировать ее защитным слоем лака (шеллак).

Для измерения кривизны поверхности полезно изготовить соответственное пробное стекло сравнительно небольшого диаметра ( $\frac{1}{2}$ — $\frac{1}{4}$  диаметра линзы). Так как в двухлинзовом объективе три поверхности выпуклые и одна вогнутая, и так как вогнутая поверхность может быть непосредственно исследована теневым методом, то нам предстоит изготовить три вогнутых пробных стекла заданных радиусов кривизны и с помощью этих пробных стекол исследовать выпуклые поверхности, наблюдая интерференционные кольца в центре линз, на краю и на промежуточной зоне.

При сферической поверхности линзы три наблюдения покажут одинаковое число колец интерференции между поверхностью

и пробным стеклом; зональные ошибки поверхности приведут к различному числу колец в трех случаях наблюдения и к некруглоте их формы.

Таким образом, мастер имеет возможность знать не только ошибку кривизны, но и ошибку формы поверхности.

Само собой разумеется, что пробные стекла должны быть сферическими и обладать заданным радиусом кривизны; но это легко достижимо, так как вогнутые сферические пробные стекла могут быть очень просто и очень точно исследованы теневым методом.

Исследовать отполированную поверхность с помощью пробного стекла, конечно, нетрудно; но как быть с исследованием, пока поверхность матовая? Положиться на сферометр? — но его точность, как мы помним, недостаточна для измерения кривизны крупных линз. Мы поступаем иначе: после шлифовки поверхности 15—30-минутным наждаком мы вручную слегка прополируем поверхность вдоль диаметра с помощью небольшого смоляного полировальника, получая таким образом дорожку с рельефом микроповерхности, схематически изображенным на рис. 114; площадок  $a$  оказывается достаточно, чтобы произвести исследование с помощью пробного стекла.

Такая прополировка дорожки вдоль диаметра выполняется буквально в несколько минут, особенно во время шлифовки линзы последними мелкими наждаками.

Что нужно сделать для изменения кривизны и формы шлифуемой поверхности — мы уже знаем, а потому в процессе тонкой шлифовки придаем поверхности линзы заданную форму с оптической точностью.

Вогнутая поверхность флишовой линзы, прополированная таким же образом вдоль диаметра, как мы сказали, исследуется теневым методом непосредственно.

Закончив с опорной поверхностью линзы, переворачиваем линзу на столе шлифовальной машины и обрабатываем таким же

образом вторую поверхность, имея целью к концу обработки получить не только заданную кривизну и сферическую форму второй поверхности, но и исчерпать припуск на толщину линзы и осуществить точную ее центровку: центровка линзы заканчивается, таким образом, в процессе тонкой шлифовки второй поверхности, и мы спокойны, что достигнутая центровка не пострадает за время полировки.

С какой же точностью должны быть отцентрированы линзы и как осуществить проверку центровки с требуемой точностью?

Для выяснения первого вопроса обратимся к рис. 118, на котором децентрированная линза представлена в виде двух частей:  $A$  — децентрированной линзы с оптической осью  $O-O$  и  $B$  — клиновидного мешка с углом при вершине  $\alpha$ .

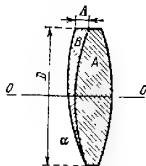


Рис. 118.

Если  $D$  — диаметр линзы и  $\Delta$  — разность между наибольшей и наименьшей толщинами линзы на краю (линейный клин), то угловой клин будет

$$\alpha = \frac{\Delta}{D}. \quad (218)$$

При  $n$  — показателе преломления стекла линзы такой клин отклонит лучи на угол  $\alpha(n-1)$ , т. е. сместит изображение в фокальной плоскости на некоторую величину  $\delta$ ; если  $f$  — фокусное расстояние линзы, то:

$$\delta = \Delta(n-1) \frac{f}{D}, \quad (219)$$

что несущественно, ввиду малости  $\Delta$ .

По так как показатели преломления для различных длин волн различны, то для луча, например,  $C$  мы получим смещение  $\delta_C$ , отличное от смещения  $\delta_F$ , например, для луча  $F$ . В результате изображение звезды вытянется в полоску в виде спектрика, длина которого от  $C$  до  $F$  равна:

$$\Delta\delta_{CF} = \Delta(n_F - n_C) \frac{F}{D}, \quad (220)$$

где  $F$  — фокусное расстояние двухлинзового астрономического объектива.

Чтобы децентрировка линзы не вызвала заметного снижения качества изображения звезды, необходимо сделать величину  $\Delta\delta_{CF}$  достаточно малой, т. е. допускать достаточно малый клин  $\Delta_{\max}$  у линз. Допуск  $\Delta_{\max}$  мы можем установить из следующих рассуждений.

В визуальном ахроматическом объективе фокусы для лучей  $C$  и  $F$  должны быть совмещены; это значит, что два волновых фронта в лучах  $C$  и  $F$  практически совпадают и имеют общий центр (фокус). Но децентрировка ( $\Delta$ ) линзы наклоняет каждый из двух фронтов на угол  $\epsilon_\Delta$ , причем для лучей  $F$  и  $C$ , согласно (219), мы будем иметь:

$$\epsilon_F = \frac{\delta_F}{f} = \frac{\Delta(n_F - 1)}{D}, \quad \epsilon_C = \frac{\delta_C}{f} = \frac{\Delta(n_C - 1)}{D}. \quad (221)$$

В результате, фронт для лучей  $F$  будет наклонен к фронту для лучей  $C$  на угол:

$$\Delta\epsilon_{FC} = \epsilon_F - \epsilon_C = \frac{\Delta(n_F - n_C)}{D}. \quad (222)$$

Так как вершина хроматической кривой отнесена к длине волны  $\lambda_0 \approx 0,555$  мкм и так как волновой фронт для лучей  $\lambda_0$  окажется заключенным приблизительно посередине между фронтами для лучей  $C$  и  $F$  (рис. 119), то при выполнении фокусировки для лучей  $\lambda_0$  волновые aberrации в лучах  $C$  и  $F$  достигнут максимальной величины  $\pm h$ , причем, согласно (222) и рис. 119,

$$\pm h = \frac{D \cdot \Delta\epsilon_{FC}}{2} = \frac{\Delta(n_F - n_C)}{2}. \quad (223)$$

Помехи от такой дисперсии, обусловленной клиновидностью линзы, будут несущественны, если волновые aberrации  $h$  не превысят  $\pm \frac{1}{4} \lambda$  (условие Рэлея). Поэтому, приравняв выражение (223)  $\frac{1}{4} \lambda$ , где  $\lambda \approx 0,555$  мкм, находим величину допуска  $\Delta_{\max}$  на линейный клин в линзе

$$\Delta_{\max} = \frac{0,278}{(n_F - n_C)} \text{ (мкм)}. \quad (224)$$

Замечательно, что  $\Delta_{\max}$  не зависит ни от  $D$ , ни от  $F$  объектива.

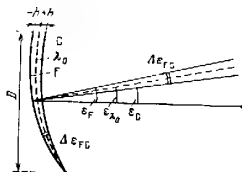


Рис. 119.

Если, например, в объективе кроновая линза выполнена из стекла К-8 ( $n_F - n_C = 0,00806$ ), а флинтсовая — из стекла Ф-2 ( $n_F - n_C = 0,01684$ ), то соответственно

$$\Delta'_{\max} = 34,6 \text{ мкм} \text{ и } \Delta''_{\max} = 16,5 \text{ мкм}.$$

Так как в действительности клиновидность (децентрировка  $\Delta$ ) может быть не у одной линзы, а у обеих одновременно, и так как при сборке линз в оправе их клинья могут сложиться, то для допусков  $\Delta_{\max}$  следует взять величины вдвое меньшие, т. е.

$$\left. \begin{array}{l} \text{для кроновых линз} \dots\dots \Delta'_{\max} \approx 17 \text{ мкм}, \\ \text{для флинтсовых линз} \dots\dots \Delta''_{\max} \approx 8 \text{ мкм}. \end{array} \right\} \quad (225)$$

При таком, может быть, преувеличенно строгом решении задачи мы гарантированы, что дифракционное изображение звезды не будет иметь несимметричной окраски в пределах спектрального интервала от С до F.

Но, кроме рассмотренной выше помехи, по-видимому, самой существенной для двухлинзового астрономического объектива, могут иметь место и другие помехи, обусловленные той же клиновидностью (децентрировкой) линз. Дополнительный клин В (рис. 118) может внести и кому и астигматизм на осн. Поэтому центровку линз следует выполнять с точностями несколько более высокими, чем это следует из выражения (225). В своих работах мы придерживаемся следующих допусков на линейный клин в линзах:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для кроновых линз} \dots\dots \Delta'_{\max} \approx 10 \text{ мкм}, \\ \text{для флинтсовых линз} \dots\dots \Delta''_{\max} \approx 5 \text{ мкм}. \end{array} \right\} \quad (226)$$

Теперь следует ответить и на второй поставленный ранее вопрос: как осуществить проверку центровки с такой высокой точностью?

Для проверки центровки линз я пользуюсь придуманным мной в 1932 г. весьма простым прибором, изображенным схематически на рис. 120. Чугунная жесткая ребристая скоба несет на себе пять опорных винтов ( $a$  и  $b$ ) и один (шестой) микрометрический винт ( $c$ ). Все винты имеют шаровые окончания. Опорные винты имеют достаточный расход передвижения в резьбе и могут быть закреплены в желательном положении с помощью контргаек. Три шарика винтов  $a$  на верхней щеке скобы образуют вершины треугольника; этими тремя точками прибор накладывается на поверхность линзы, показанной на рисунке прерывистой линией. Прибор перемещается по поверхности линзы до тех пор, пока два шарика винтов  $b$  не упрутся в обод линзы. Таким образом прибор оказывается подвешенным на краю линзы, а его пять точек — три точки  $a$  и две точки  $b$  — однозначно определяют положение микрометрического винта с относительно края линзы. Закручиваем микрометрический винт  $c$ , пока не наступит контакт между его шариком и нижней поверхностью линзы, и делаем первый отсчет  $N_1$  по барабану микрометрического винта.

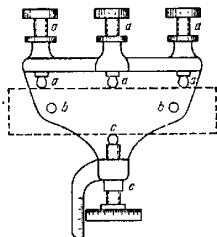


Рис. 120.

Смещаем прибор на какой-нибудь новый участок линзы и производим такое же измерение по новому азимуту линзы, получая второй отсчет  $N_2$  и т. д.

В данном случае замечательно то, что измерение толщины линзы производится всегда на одном и том же расстоянии от ее обода, а вместе с тем и от ее механической оси; при этом толщина измеряется под одним и тем же углом наклона к этой оси.

Но для проверки центровки нам не нужно знать абсолютной толщины линзы: в правильно отцентрированной линзе все отсчеты —  $N_1$ ,  $N_2$  и т. д. — должны быть равными (одинаковыми). Поэтому от микрометрического винта мы не требуем точности, а требуем лишь чувствительности его перемещений и отсчет: винт должен двигаться очень плавно и иметь малый шаг, а барабан должен иметь достаточный диаметр и достаточное количество делений.

Чувствительность измерений на нашем приборе, по-видимому, близка к 3 мкм, а потому клин в 5 мкм (226) мы довольно уверенно обнаруживали\*).

Для определения величины и направления клина достаточно произвести три измерения по трем равноудаленным азимутам

\*) Целая деления отечественных микрометров 1 ИГМ, выпускаемых с 1961 г., составляет 1 мкм, а чувствительность — доли мкм. (Прим. ред.)

на краю линзы; но большее число измерений, конечно предпочтительнее трех.

Обнаружив клин, превышающий допуск (226), мы шлифуем его при установленном шпинделе машины, работая шлифовальником при одностороннем выносе в сторону наибольшей толщины линзы.

Для проверки центрировки линзу можно не снимать со стола шлифовальной машины, а на тыльной залакированной стороне следует смыть лак, по крайней мере, в трех точках, чтобы иметь возможность установить наш прибор в трех равноудаленных положениях и касаться шариком микрометричного винта с не лакового слоя, а стеклинной поверхности линзы.

Итак, у нас обе линзы отшлифованы, отцентрированы, отполированы, имеют надлежащие толщины, кривизны и сферическую форму поверхностей. Собираем линзы объектива в оправу так, чтобы оптические оси линз совпадали одна с другой; иначе говоря, центрируем одну линзу относительно другой.

Центрировка линз в оправе обычно производится так: на внутренний торец оправы наклеиваются три листочка фольги в трех равноудаленных точках; затем укладывается на эти три точки соответственная линза; к одной из линз, и также в трех равноудаленных точках, приклеиваются такие же три листочка надлежащей и одинаковой толщины; равенство толщин этих трех прокладок и обеспечит правильную взаимную центрировку линз; затем укладывается в гнездо вторая линза, а затем кольцо или иное приспособление с тремя равноудаленными точками, прижимающими одну линзу к другой с достаточной, но не чрезмерной силой; необходимо собрать линзы в оправе так, чтобы опорные выступы каждого из трех поясов приходились один против другого.

В этой операции самым ответственным условием является равенство толщин трех листочков, разделяющих и центрирующих линзы; это равенство с необходимой оптической точностью не так-то просто выполнить; и у листочков может быть различная толщина, и шеллачный клей может по-разному приподнять листочки и нагрузку воспримет не вся поверхность каждого листочка, но отдельные его точки, которые затем могут различным образом деформироваться. Во всяком случае необходимо произвести контроль взаимной центрировки линз. Для этой цели я применяю следующий очень простой способ \*).

\*) *Максутов Д.* Способ центрировки стекол объектива. — Авторское свидетельство № 49374, по заявке от 29 апреля 1936 г.

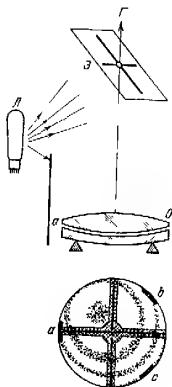


Рис. 121.

Над объективом  $O$  (рис. 121) держится в руках наклонный экран  $\mathcal{E}$  из белой патманской бумаги; в экране сделано круглое отверстие диаметром 2—5 мм и начерчен тушью жирный крест (через центр отверстия); ртутная лампа  $\mathcal{L}$  освещает экран  $\mathcal{E}$  монохроматическим светом; этот свет, диффузно рассеиваясь от экрана, освещает объектив  $O$ . Глаз наблюдателя  $\Gamma$ , расположенный над экраном, наблюдает объектив  $O$  через отверстие в экране и видит, во-первых, систему колец Ньютона, перемещающуюся по поверхности объектива вместе с движением экрана и глаза, и во-вторых, три изображения креста, имеющие различные размеры и перемещающиеся с различными скоростями вместе с движением экрана. Изображения крестов получились в результате отражения лучей от поверхностей линз. Хотя у линз четыре поверхности, но практически наблюдаются только три креста, так как в двухлинзовом ахроматическом объективе кривизны второй и третьей поверхностей почти одинаковы. Двигая глаз вместе с экраном в плоскости, перпендикулярной оси объектива, мы улавливаем моменты, когда три креста совмещаются: это признак того, что в данные моменты отверстие в экране и глаз наблюдателя находятся на оси объектива. В эти моменты и следует наблюдать расположение системы колец Ньютона относительно центра крестов. Такая картина изображена внизу рис. 121; она говорит нам о том, что толщина листочка с больше толщины листочков  $a$  и  $b$ , а значит этот первый листочек и нужно поднабивать ланцетом, пока кольца Ньютона не окажутся концентричными центру трех совмещенных крестов. Как понимает читатель, такая центровка, во-первых, может быть выполнена с очень высокой («оптической») точностью и, во-вторых, она крайне проста, наглядна и не требует никакой сложной аппаратуры.

Собрав и отцентрировал объектив в оправе, мы можем впервые по-настоящему его исследовать.

Для исследования применяется автоколлимационная схема (рис. 122), где  $O$  — исследуемый объектив,  $B$  — плоское автоколлимационное зеркало,  $S$  и  $N$  — светящаяся точка и нож тепевого прибора.

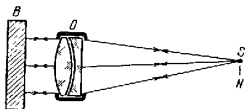


Рис. 122.

Если в стеклах объектива не было свилей и неоднородностей, если объектив выполнен правильно по расчету и если мы пользуемся монохроматическим светом надлежащей длины волны, то в общем случае мы должны будем обнаружить лишь картину ошибок, имеющих центральную симметрию, т. е. зональных ошибок.

Это происходит по вполне понятной причине: ведь только одну из четырех поверхностей — вогнутую поверхность флинт-вой линзы — мы могли получить с необходимой для нас точно-



стью, исследуя ее тепевым методом из центра кривизны; остальные же три выпуклые поверхности мы исследовали с помощью пробных стекол уменьшенного диаметра (а может быть ничем, кроме сферометра, их и не исследовали); но если диаметр пробного стекла в  $k$  раз меньше диаметра испытуемой поверхности, то точность исследования снижается в  $k^2$  раз и может оказаться явно недостаточной для получения хорошего объектива.

Поэтому необходимо выполнить ретушь объектива, избрав для этого любую из его четырех поверхностей. В двухлинзовом астрономическом объективе выбор поверхности для ретуши может быть обусловлен, во-первых, удобством извлечения линзы из оправы и укладки ее на стол полировальной машины, во-вторых, наличием сохранившегося полпроваляника от последней обрабатывавшейся поверхности и, в-третьих, твердостью и химической стойкостью стекла линзы: так, мы предпочитаем не ретушировать флинтовых линз, которые и легче царапаются и склоны покрываться налетами во время полировки. В объективах более сложных конструкций, например, в триплетах, выбор поверхности для ретуши диктуется и некоторыми чисто оптическими соображениями, и здесь нельзя дать для каждого случая общего рецепта.

Изложенного в настоящей книге материала достаточно, чтобы представить себе, как производится ретушь (зональная и даже местная), как измеряется зональная абберрация, как исследуются хроматические свойства объектива, т. е. его вторичный спектр и сферохроматическая абберрация, и как измеряется астигматизм на оси (если таковой почему-либо имеется) и на побочных осях. Хорошо сконструированный теневой прибор позволяет с высокой точностью выполнить все эти исследования.

Рассмотрев на примере двухлинзового объектива технологический процесс изготовления преломляющей оптики, мы можем, частично или полностью, перенести его на другие случаи изготовления преломляющей оптики такой, как крупные спектральные призмы, мениски, плоскопараллельные пластины и астрофотообъективы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

(Оно же и предисловие)

В этой книге освещена лишь часть вопросов, связанных с технологией изготовления астрономической оптики.

О многих интересных вопросах методики исследования я сознательно умолчал, так как не пишу истории данного вопроса, а описываю только ту методику, которой владею сам и которую считаю наиболее рациональной для конечной цели — изготовления первоклассной крупной оптики. По этой причине я не уделил внимания ни методу Гартмана, ни интерферометрическим методам. Я не затрагивал вопроса о производительности холодной обработки и об ее ускорителях, считая, что трудоемкость работ по крупной оптике определяется, в основном, трудностями контроля и длительностью времени отстойки.

Если мне укажут, что при некотором режиме работы стаика или при некоторых абразивах я могу значительно повысить производительность, но что при этом возрастет риск испортить или повредить изделие, или образовать на его поверхности менее устойчивую защитную пленку или, наконец, снизить качество формы поверхности, — я откажусь от такого пути, хотя бы он был и очень рационален в производстве мелкой оптики.

Построив теорию допусков на критерии Рэлея ( $\frac{1}{4} \lambda$ ), я сильно упростил эту теорию. Действительно, при различной форме кривых волновой aberrации, но при одинаковом значении их максимумов, равных четверти волны, распределение энергии в дифракционном изображении не будет одинаковым и снижение качества изображения также не будет одинаковым, как это я молчаливо предполагаю в соответствующих местах книги. Но если от приближенной оценки качества изображения перейти к точной оценке, то для каждого частного случая и вопроса пришлось бы предпринимать чрезвычайно сложные математические исследования. Поэтому, лучше дать приближенные ответы на вопросы, чем не давать их вовсе.

Теория шлифовки и полировки не входит в круг моей специальности, и здесь я мог многое истолковывать с недостаточной строгостью и, так сказать, понаслышке или на основании личной интуиции мастера. Интересующихся более подробно этими вопросами следует направить к первоисточникам, т. е. к работам И. В. Гребенщикова, Н. Н. Качалова, К. Г. Куманина и сотрудников их школ.

Но, что мною сознательно опущено — это вопрос о покрытиях поверхностей металлических слоями и вопрос о просветлении крупной оптики.

Эти вопросы особенно близки именно астрономической оптике, где каждый процент экономии света оказывается желательным и важным, но вся беда в том, что на сегодня у меня нет достаточного материала, чтобы говорить о наивыгоднейшем металлическом покрытии зеркал или о наилучшем способе просветления линз. Исторического же обзора я предпринимать не собирался. Все же рассмотрим бегло эти два вопроса.

Совершенно ясно, что серебряные зеркала уже сдали в архив. Серебряный слой и слишком недолговечен и слишком мало отражает света для коротковолновой части спектра, особенно интересующей современного астронома. С 1934 г. у нас с успехом применяется алюминирование астрономических зеркал. Алюминий испаряется в вакууме на зеркальную поверхность, приобретающую хорошие зеркальные свойства, т. е. достаточно высокий коэффициент отражения, несравнимо большую долговечность и почти полное отсутствие диффузно рассеянного света. Вакуумная техника испарения алюминия достаточно сложна и капризна, однако она не помешала алюминированию  $2\frac{1}{2}$ -метрового зеркала маунтвилсоновского телескопа; в скором времени предполагается таким же образом алюминировать гигантское зеркало с диаметром 5 м.

И все же, алюминированное зеркало отражает меньше света, чем это хотелось бы оптику и астроному. В видимой части спектра коэффициент отражения алюминированного зеркала достигает 89%, заметно, хотя и плавно, снижаясь в обе стороны от максимума и достигая значения около 80% для длины волны 0,300 мкм \*).

Так как в зеркальных телескопах не одно, а два и более зеркал, то общие потери света при отражении от алюминированных зеркал достаточно велики.

Не выделяя просветления оптики в отдельную главу, о нем можно здесь в самых общих чертах сказать следующее. Если на поверхность стекла с показателем преломления  $n_1$  нанести каким-то образом прозрачную пленку малой толщины  $\delta$  и с показателем преломления  $n_2$ , то лучи, отраженные от поверхности «воздух — пленка» и поверхности «пленка — стекло», будут интерферировать, а колебания будут складываться по закону сложения двух колебаний одинаковой частоты, но различных фаз. Сумма двух колебаний минимальна, когда они разнятся по фазе на  $\frac{1}{2}$  волны, а для этого оптическая толщина пленки  $\delta n_2$  должна

\*) Развитие вакуумной техники позволяет сейчас алюминировать зеркало любого диаметра. Более того, направленное распыление позволяет корректировать зональные ошибки зеркал. (Прим. ред.)

быть равна  $\frac{1}{4}$  волны при нормальном падении лучей. Сумма двух колебаний при этом может обратиться в нуль, если амплитуды двух колебаний численно равны, а это возможно в случае, когда  $n_2 = \sqrt{n_1}$ . Так, для пленки, вполне просветляющей стекло с показателем  $n_1 = 1,5$ , необходим  $n_2 = 1,22$ ; таким же образом для  $n_1 = 1,7$  необходим  $n_2 = 1,3$ . Что же делать, если в нашем распоряжении нет подходящих веществ со столь низкими показателями преломления? Осаждают пленки с возможно меньшим  $n_2$ , хотя бы и недостаточным для полного уничтожения отраженного света. В этом случае просветление стекол с большим  $n_1$  (например, флинтгов), будет выполнено лучше, чем просветление стекол с малым  $n_1$  (например, кронов). Иди по этому пути, мы можем осуществить на поверхности стекла пленку подлежащей толщины  $\left(\delta n_2 = \frac{1}{4} \lambda\right)$ , например, из кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ), обладающего сравнительно со стеклами меньшим показателем преломления, и ожидать снижения коэффициентов отражения: для кронов с 4—4,5% до 2,5—2,0%, а для флинтгов с 5—6% до 1,5—1%.

Наноса на стекла пленки из некоторых фтористых соединений, у которых показатель преломления ниже, чем у кремнезема, можно осуществить еще большее снижение коэффициентов отражения.

Наконец, имеются возможности нанесения не плотных сплошных пленок, но пленок пористых или рыхлых, средний показатель преломления которых может оказаться достаточно малым, чтобы удовлетворить условию  $n_2 = \sqrt{n_1}$ ; в этом случае может быть осуществлено полное просветление оптики, конечно, только для некоторой длины волны  $\lambda$  (так как  $n$  есть функция  $\lambda$ ) и для некоторого наклона падающих на поверхность лучей (так как оптическая длина пути луча в пленке зависит от направления хода луча). Но такие рыхлые пленки особенно непрочны.

Проблема просветления стекла, как мы видим, не настолько еще продвинулась, чтобы можно было указать хороший рецепт для просветления крупной астрономической оптики и притом для достижения существенного результата по снижению коэффициента отражения без риска повреждения качества оптической поверхности в процессе просветления и в дальнейшем при эксплуатации астрономического инструмента. Поэтому необходимо выждать некоторое время и провести некоторые дополнительные экспериментальные проверки, прежде чем выступать с обоснованными рекомендациями.

Подводя итоги своей 36-летней работы в области изготовления и исследования астрономической оптики, я хотел бы с возможной объективностью охарактеризовать уровень наших достижений и возможностей.

Применяемая нами методика контроля — в основном теневая — дает возможность осуществлять оптические системы выс-

шей точности. Мы совершенно удовлетворены этой методикой и не ощущаем практической потребности в переходе на какую-либо другую методику.

Мы владеем искусством изготовления точных оптических поверхностей и в этом смысле стоим не ниже, а, по-видимому, выше многих зарубежных фирм с крупными именами; особенно это относится к изготовлению плоскостей, асферических поверхностей и ретушированной оптики.

Применяемый нами технологический процесс нас вполне удовлетворяет с принципиальной стороны. В то же время мы можем сожалеть о не всегда достаточной механизации и оборудованности процесса. Зачастую это затрудняет работу, уменьшает ее производительность и повышает элемент риска в работе. Но наш технологический процесс в основном правилен. Так, мы обращаем должное внимание на разгрузку изделий и шлифовальников.

Мы остановились на простейшем прямолинейном штрихе, как на наиболее рациональном, и научились сознательно управлять процессом придания поверхности желательной формы.

Наша методика изготовления резко выраженных асферических поверхностей позволила достигать таких асферичностей, которые прежде считались недостижимыми при условии первоклассного качества поверхности. Методика эта достаточно проста, но и вполне оригинальна.

Владея технологическим процессом изготовления первоклассной оптики — сферической, плоской и асферической — с диаметром отверстия до 1 м, мы смело можем экстраполировать наш опыт на изготовление такой же оптики до ~3 м в диаметре и полагаем, что никаких неожиданностей и особых принципиальных трудностей, в пределах нашей узкой компетенции, мы не встретим.

Но выходя за границы нашей узкой компетенции, мы сознаем все трудности развития крупного астрономического приборостроения, стоящего сейчас перед нами в виде первоочередной задачи. Здесь будут большие трудности и в конструировании, и в механической обработке точных деталей астрономических инструментов, и в сборке и юстировке, и в вопросах производства оптического или технического стекла, а также и металлических сотовых зеркал, и в вопросах покрытия крупных зеркал и просветления крупной оптики и т. д. Но ни одна из этих трудностей, можно сказать теперь с уверенностью, не принадлежит к числу непреодолимых.